

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RODOLFO ROSENDO DE CARVALHO

EROSÃO A JUSANTE DE BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO
HIDRÁULICO DE VERTEDOUROS:
APLICAÇÃO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL

CURITIBA

2017

RODOLFO ROSENDO DE CARVALHO

EROSÃO A JUSANTE DE BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO
HIDRÁULICO DE VERTEDOUROS:
APLICAÇÃO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL

Dissertação apresentada como requisito parcial a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos, no curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Michael Mannich

CURITIBA

2017

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C331e Carvalho, Rodolfo Rosendo de
Erosão a jusante de bacias de dissipação por ressalto
hidráulico de vertedouros: aplicação de modelagem
computacional [recurso eletrônico] / Rodolfo Rosendo de
Carvalho – Curitiba, 2017.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de
Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Michael Mannich

1. Vertedouro. 2. Erosão. 3. Bacia de dissipação. I.
Universidade Federal do Paraná. II. Mannich, Michael. III.
Título.

CDD: 627

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **RODOLFO ROSENDO DE CARVALHO**, intitulada: **"EROSÃO A JUSANTE DE BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO DE VERTEDOUROS: APLICAÇÃO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL"**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 11 de Outubro de 2017.



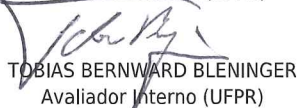
MICHAEL MANNICH
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)



JOSÉ JUNJI OTA
Avaliador Interno (UFPR)



MAURÍCIO FELGA GOBBI
Avaliador Externo (UFPR)



TOBIAS BERNWARD BLENINGER
Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre mostrar o caminho.

A minha família por todo o acolhimento e proteção que sempre ofereceram. Em especial, aos meus pais Maria Laura e Marcos pela oportunidade da vida, a minha irmã Déborah pela eterna amizade e aos meus avós Alevino e Neusa pelos exemplos que são. A minha esposa Camila por toda a compreensão, incentivo e amor dispensado, você foi essencial neste processo.

À Intertechne pelo incentivo à realização deste trabalho e por disponibilizar as ferramentas para que ele fosse possível. Aos meus companheiros de trabalho pelos ensinamentos compartilhados diariamente.

Aos amigos de propósito por sempre estarem juntos e compartilharem as experiências vividas. Aos amigos da vida que, perto ou longe, serviram de incentivo e inspiração para que esse trabalho fosse possível.

Aos professores membros da banca de qualificação, professor Tobias Bleninger e professor José Ota, pelas sugestões que tanto contribuíram para este trabalho. Aos professores membros da banca de defesa, professor Tobias Bleninger, professor José Ota e professor Maurício Gobbi por aceitaram este convite.

Ao meu orientador Michael Mannich por todo o aprendizado, pelo tempo dispensado e pela paciência durante este processo.

A Universidade Federal do Paraná pelo ensino de qualidade e por minha formação profissional e como cidadão.

Ao PPGERHA por permitirem que, mesmo em condições adversas, fosse possível a conclusão desse trabalho.

RESUMO

Com o advento da capacidade de processamento dos computadores, a modelagem numérica de fenômenos hidráulicos tem sido cada vez mais utilizada para a resolução de problemas de engenharia. Vários modelos matemáticos comerciais oferecem pacotes para a resolução de problemas envolvendo o escoamento de sedimentos, erosão e deposição em rios. O objetivo geral dessa dissertação é o estudo das erosões a jusante de bacias de dissipação por ressalto hidráulico utilizando as ferramentas de modelagem computacional presentes no *software* FLOW 3D® em um estudo de caso do vertedouro do AHE São Salvador, onde foram realizados ensaios em modelo hidráulico reduzido (modelo físico) para determinação das profundidades de erosão a jusante da bacia de dissipação do vertedouro. Os estudos foram pautados em análises quantitativas e qualitativas dos resultados obtidos no modelo computacional frente aos resultados obtidos no modelo físico reduzido. Numa primeira etapa, buscou-se avaliar as condições hidráulicas na bacia de dissipação obtidas no modelo computacional através de simulações com consideração de fundo fixo a jusante dessa estrutura, sendo os resultados obtidos satisfatórios. A segunda etapa do estudo consistiu em simulações com consideração de fundo móvel a jusante da bacia de dissipação para avaliação das erosões e deposições obtidas. Nas condições estudadas o modelo numérico subestimou tanto as erosões quanto as deposições observadas no modelo físico. Frente a esses resultados, buscou-se avaliar a sensibilidade do modelo computacional a parâmetros como ângulo de atrito do material móvel, condições de contorno laterais do modelo, modelo de turbulência utilizado para a resolução do problema e do diâmetro médio do material móvel utilizado. A análise de sensibilidade foi realizada mediante comparação dos resultados de erosão e deposição observados. As análises realizadas permitiram concluir sobre a dificuldade de se simular escoamentos com transporte de material solto com diâmetros médios da mesma ordem de grandeza dos componentes das estruturas, uma vez que as malhas utilizadas nas simulações devem ser densas o suficiente para a correta reprodução da geometria da estrutura e grandes o suficientes para permitir o uso das equações de transporte do modelo.

Palavras-chaves: erosão, bacia de dissipação, vertedouro.

ABSTRACT

With the advent of computer processing capacity, numerical modeling of hydraulic phenomena has been increasingly used to solve engineering problems. Several commercial mathematical models offer packages for solving problems involving sediment flow, erosion, and deposition in rivers. The general objective of this dissertation is the study of the downstream erosions of stilling basins using the computational model tools of the software FLOW 3D[®], in a case study of the AHE São Salvador's spillway, where tests were performed in a reduced hydraulic model (physical model) to determine erosion depths downstream of the spillway stilling basin. The studies were based on quantitative and qualitative analyzes of the results obtained in the computational model compared to the results obtained in the physical model. In a first stage, was evaluate the hydraulic conditions in the stilling basin obtained in the computational model through simulations with consideration of fixed bottom downstream of this structure, and the results were satisfactory. The second stage of the study consisted of simulations of moving bottom downstream of the stilling basin to evaluate the erosion and deposition. Under the conditions studied, the numerical model underestimated both the erosions and the depositions observed in the physical model. In order to evaluate the sensitivity of the model to parameters such as friction angle of the mobile material, lateral contour conditions of the model, turbulence model used to solve the problem and the average diameter of the mobile material used. Sensitivity analysis was performed by comparing the observed erosion and deposition results. The analysis made it possible to conclude on the difficulty of simulating flows with transport of loose material with average diameters of the same order of magnitude of the components of the structures, since the meshes used in the simulations must be dense enough for the correct reproduction of the geometry of the structure and large enough to allow the use of the transport equations of the model.

Keywords: erosion, stilling basin, spillway.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EROÇÃO A JUSANTE DO VERTEDOURO DE SOBRADINHO	24
FIGURA 2 – EROÇÃO A JUSANTE DO VERTEDOURO DE WIVENHOE DAM	25
FIGURA 3 – EROÇÃO A JUSANTE DO VERTEDOURO DE MARIMBONDO	25
FIGURA 4 – TIPOS DE ESCOAMENTO A JUSANTE DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS	31
FIGURA 5 – VARIÁVEIS DAS EQUAÇÕES PROPOSTAS POR NOVAK (1961) E CATAKLI ET AL. (1973)	32
FIGURA 6 – VARIÁVEIS DA EQUAÇÃO PROPOSTA POR SCHOKLITSCH (1951).	33
FIGURA 7 – MACIÇO ROCHOSO HETEROGÊNEO – UHE SINOP	34
FIGURA 8 – DEMARCAÇÃO DAS FALHAS GEOLÓGICAS A JUSANTE DE UMA ESTRUTURA HIDRÁULICA	34
FIGURA 9 – FISSURAS NO MACIÇO ROCHOSO A JUSANTE DE UMA ESTRUTURA HIDRÁULICA APÓS PASSAGEM DE UMA CHEIA – BARRAGEM DE COPETOW	35
FIGURA 10 – ESQUEMA DOS EXPERIMENTOS DE REINIUS	35
FIGURA 11 – DIAGRAMA DE FORÇAS ATUANTES EM UM BLOCO DE ROCHA.....	37
FIGURA 12 – MECANISMOS DE RUPTURA DE MACIÇOS ROCHOSO SUBMETIDOS A ESCOAMENTO TURBULENTO	38
FIGURA 13 – MEDIÇÃO TÍPICA DE VELOCIDADE NUM ESCOAMENTO TURBULENTO.....	40
FIGURA 14 – TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	44
FIGURA 15 – ESQUEMA DO TRANPOSRTTE DE SEDIMENTOS EM MEIO A UM FLUIDO.....	45
FIGURA 16 – CLASSIFICAÇÃO DO LEITO QUANTO À SUA FORMA.....	45
FIGURA 17 – DIAGRAMA DE SHIELDS.....	48
FIGURA 18 – DECLIVIDADE DO LEITO E DIREÇÃO DO FLUXO	49
FIGURA 19 – RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS COM MODELAGEM 1D, 2D E 3D.....	54
FIGURA 20 – AHE SÃO SALVADOR	58
FIGURA 21 – ESTRUTURA DO VERTEDOURO DA AHE SÃO SALVADOR – PROJETO	60

FIGURA 22 – ESTRUTURA DO VERTEDOURO DA AHE SÃO SALVADOR – MODELO FÍSICO	60
FIGURA 23 – ENSAIO COM A VAZÃO DE 113,7 L/S (9515 M³/S EM PROTÓTIPO).....	61
FIGURA 24 – PRESSÕES MEDIDAS NO ENSAIO COM A VAZÃO DE 113,7 L/S (9515 M³/S EM PROTÓTIPO).....	61
FIGURA 25 – CONFIGURAÇÃO INICIAL DO FUNDO MÓVEL A JUSANTE DA BACIA DE DISSIPAÇÃO DO VERTEDOURO.....	62
FIGURA 26 – ENSAIO COM FUNDO MÓVEL A JUSANTE DA BACIA DE DISSIPAÇÃO DO VERTEDOURO - VAZÃO DE 113,7 L/S (9515 M³/S EM PROTÓTIPO).....	64
FIGURA 27 – EXEMPLO DE MALHA COMPUTACIONAL NO MÉTODO “VOF – VOLUME OF FLUID”	65
FIGURA 28 – FLUXOGRAMA DA SEQUÊNCIA DE SIMULAÇÕES REALIZADAS	67
FIGURA 29 – MALHA UTILIZADA NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO FIXO	71
FIGURA 30 – MALHA UTILIZADA NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO MÓVEL	72
FIGURA 31 – CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO FIXO	75
FIGURA 32 – CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO MÓVEL	75
FIGURA 33 – CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO MÓVEL – ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DA CONDIÇÃO DE CONTORNO DO MODELO.....	76
FIGURA 34 – CONDIÇÃO INICIAL DO FLUIDO NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO FIXO.....	77
FIGURA 35 – CONDIÇÃO INICIAL DO FLUIDO NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO MÓVEL.....	78
FIGURA 36 – LOCAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO NO MODELO NUMÉRICO.....	81
FIGURA 37 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA VAZÃO NOS ÚLTIMOS 50 SEGUNDOS DA SIMULAÇÃO COM FUNDO FIXO – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \varepsilon$ RNG.....	82
FIGURA 38 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA VAZÃO NOS ÚLTIMOS 50 SEGUNDOS DA SIMULAÇÃO COM FUNDO FIXO – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$	82

FIGURA 39 – PRESSÕES AO LONGO DA CRISTA DO VERTEDOURO E DA BACIA DE DISSIPAÇÃO – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \varepsilon$ RNG....	84
FIGURA 40 – PRESSÕES AO LONGO DA CRISTA DO VERTEDOURO E DA BACIA DE DISSIPAÇÃO – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$	85
FIGURA 41 – PERFIL DA LINHA DE ÁGUA AO LONGO DO VERTEDOURO – $k - \varepsilon$ RNG.....	86
FIGURA 42 – PERFIL DA LINHA DE ÁGUA AO LONGO DO VERTEDOURO – $k - \omega$	87
FIGURA 43 – PONTOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADES.....	88
FIGURA 44 – REGISTROS FOTOGRÁFICOS REALIZADOS EM MODELO FÍSICO – VAZÃO DE 113,7 L/S.....	90
FIGURA 45 – CORTE LONGITUDINAL PELO CENTRO DO VÃO CENTRAL DO VERTEDOURO APÓS O ENSAIO/SIMULAÇÃO – VAZÃO DE 113,7 L/S	90
FIGURA 46 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE DAS ALTERAÇÕES NO FUNDO AO LONGO DO TEMPO.....	92
FIGURA 47 – MUDANÇA NA ELEVAÇÃO DO FUNDO AO LONGO DO TEMPO – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 8$	93
FIGURA 48 – MUDANÇA NA ELEVAÇÃO DO FUNDO AO LONGO DO TEMPO – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 13$	94
FIGURA 49 – MUDANÇA NA ELEVAÇÃO DO FUNDO AO LONGO DO TEMPO – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN - $\beta_{NI}, n = 12$	94
FIGURA 50 – LOCALIZAÇÃO DOS CORTES PARA APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	95
FIGURA 51 – CORTE LONGITUDINAL NO VÃO CENTRAL DO VERTEDOURO - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E MODELO FÍSICO COM FUNDO MÓVEL	96
FIGURA 52 – CORTE LONGITUDINAL NO VÃO CENTRAL DO VERTEDOURO - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E MODELO FÍSICO COM FUNDO MÓVEL – ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	98
FIGURA 53 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 8$ - PLANTA.....	116

FIGURA 54 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 8$ – CORTE NO CENTRO DO VÃO	116
FIGURA 55 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 8$ – CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA	117
FIGURA 56 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 8$ – CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA	117
FIGURA 57 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 13$ - PLANTA	118
FIGURA 58 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 13$ – CORTE NO CENTRO DO VÃO	118
FIGURA 59 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 13$ – CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA	119
FIGURA 60 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 13$ – CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA	119
FIGURA 61 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN - PLANTA	120
FIGURA 62 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN – CORTE NO CENTRO DO VÃO	120
FIGURA 63 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN – CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA....	121
FIGURA 64 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN – CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA	121
FIGURA 65 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 8$ - PLANTA	124
FIGURA 66 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 8$ – CORTE NO CENTRO DO VÃO	124
FIGURA 67 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 8$ – CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA	125
FIGURA 68 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 8$ – CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA	125
FIGURA 69 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 13$ - PLANTA	126
FIGURA 70 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 13$ – CORTE NO CENTRO DO VÃO	126
FIGURA 71 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 13$ – CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA	127

FIGURA 72 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM}, n = 13$ – CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA	127
FIGURA 73 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN - PLANTA	128
FIGURA 74 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN – CORTE NO CENTRO DO VÃO	128
FIGURA 75 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN – CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA....	129
FIGURA 76 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN – CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA.....	129
FIGURA 77 – SIMULAÇÃO 4 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO JUNTO AS LATERAIS - PLANTA	130
FIGURA 78 – SIMULAÇÃO 4 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE NO CENTRO DO VÃO	130
FIGURA 79 – SIMULAÇÃO 4 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA.....	131
FIGURA 80 – SIMULAÇÃO 4 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA.....	131
FIGURA 81 – SIMULAÇÃO 5 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – ÂNGULO DE ATRITO = 20° - PLANTA	132
FIGURA 82 – SIMULAÇÃO 5 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – ÂNGULO DE ATRITO = 20° - CORTE NO CENTRO DO VÃO	132
FIGURA 83 – SIMULAÇÃO 5 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – ÂNGULO DE ATRITO = 20° - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA	133
FIGURA 84 – SIMULAÇÃO 5 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – ÂNGULO DE ATRITO = 20° - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA	133
FIGURA 85 – SIMULAÇÃO 6 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO JUNTO AS LATERAIS E ÂNGULO DE ATRITO DE 20° - PLANTA	134
FIGURA 86 – SIMULAÇÃO 6 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO NAS LATERAIS E ÂNGULO DE ATRITO DE 20° - CORTE NO CENTRO DO VÃO	134
FIGURA 87 – SIMULAÇÃO 6 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO NAS LATERAIS E ÂNGULO DE ATRITO DE 20° - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA.....	135

FIGURA 88 – SIMULAÇÃO 6 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO NAS LATERAIS E ÂNGULO DE ATRITO DE 20° - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA	135
FIGURA 89 – SIMULAÇÃO 7 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ - PLANTA.....	136
FIGURA 90 – SIMULAÇÃO 7 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ - CORTE NO CENTRO DO VÃO.....	136
FIGURA 91 – SIMULAÇÃO 7 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA.....	137
FIGURA 92 – SIMULAÇÃO 7 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA.....	137
FIGURA 93 – SIMULAÇÃO 8 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - PLANTA	138
FIGURA 94 – SIMULAÇÃO 8 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE NO CENTRO DO VÃO.....	138
FIGURA 95 – SIMULAÇÃO 8 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA.....	139
FIGURA 96 – SIMULAÇÃO 8 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA.....	139
FIGURA 97 – SIMULAÇÃO 9 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM - PLANTA.....	140
FIGURA 98 – SIMULAÇÃO 9 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM - CORTE NO CENTRO DO VÃO	140
FIGURA 99 – SIMULAÇÃO 9 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA.....	141

FIGURA 100 – SIMULAÇÃO 9 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA.....	141
FIGURA 101 – SIMULAÇÃO 10 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - PLANTA	142
FIGURA 102 – SIMULAÇÃO 10 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE NO CENTRO DO VÃO	142
FIGURA 103 – SIMULAÇÃO 10 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA.....	143
FIGURA 104 – SIMULAÇÃO 10 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA.....	143
FIGURA 105 – SIMULAÇÃO 11 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM - PLANTA	144
FIGURA 106 – SIMULAÇÃO 11 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM - CORTE NO CENTRO DO VÃO	144
FIGURA 107 – SIMULAÇÃO 11 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA.....	145
FIGURA 108 – SIMULAÇÃO 11 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA.....	145
FIGURA 109 – SIMULAÇÃO 12 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - PLANTA	146
FIGURA 110 – SIMULAÇÃO 12 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE NO CENTRO DO VÃO	146

FIGURA 111 – SIMULAÇÃO 12 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA.....	147
FIGURA 112 – SIMULAÇÃO 12 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA.....	147
FIGURA 113 – SIMULAÇÃO 1 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE	149
FIGURA 114 – SIMULAÇÃO 2 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE	149
FIGURA 115 – SIMULAÇÃO 3 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE	149
FIGURA 116 – SIMULAÇÃO 4 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE	150
FIGURA 117 – SIMULAÇÃO 5 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE	150
FIGURA 118 – SIMULAÇÃO 6 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE	150
FIGURA 119 – SIMULAÇÃO 7 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE	151
FIGURA 120 – SIMULAÇÃO 8 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE	151
FIGURA 121 – SIMULAÇÃO 9 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE	151
FIGURA 122 – SIMULAÇÃO 10 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE	152
FIGURA 123 – SIMULAÇÃO 11 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE	152
FIGURA 124 – SIMULAÇÃO 12 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE	152

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – OBTENÇÃO DO COEFICIENTE ζ_0	50
TABELA 2 – NÍVEIS OPERACIONAIS DA AHE SÃO SALVADOR	59
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE FUNDO MÓVEL.....	62
TABELA 4 – ENSAIOS REALIZADOS COM FUNDO MÓVEL NO MODELO FÍSICO	63
TABELA 5 – SIMULAÇÕES REALIZADAS NO MODELO NUMÉRICO – 50 MINUTOS	68
TABELA 6 – SIMULAÇÕES REALIZADAS NO MODELO NUMÉRICO – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – 10 MINUTOS	68
TABELA 7 – CARACTERÍSTICAS DA MALHA NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO FIXO	70
TABELA 8 – CARACTERÍSTICAS DA MALHA NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO MÓVEL	72
TABELA 9 – TIPO DE CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES	74
TABELA 10 – NÍVEIS DE ÁGUA IMPOSTOS NAS SIMULAÇÕES	76
TABELA 11 – CONDIÇÕES INICIAIS NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO FIXO	77
TABELA 12 – VAZÕES NO MODELO FÍSICO E VAZÕES OBTIDAS NO MODELO NUMÉRICO	83
TABELA 13 – DIFERENÇAS ENTRE OS RESULTADOS DE PRESSÕES OBTIDOS NO MODELO FÍSICO E NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA - RESUMO	85
TABELA 14 – PERFIL DA LINHA DE ÁGUA AO LONGO DO VERTEDOURO – DIFERENÇAS MÁXIMAS E ERRO MÉDIO QUADRÁTICO - RESUMO	87
TABELA 15 – COORDENADAS DOS PONTOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADES	88
TABELA 16 – VELOCIDADES MEDIDAS – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \varepsilon$ RNG.....	89
TABELA 17 – VELOCIDADES MEDIDAS – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$	89

TABELA 18 – SIMULAÇÕES REALIZADAS NO MODELO NUMÉRICO.....	91
TABELA 19 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE DAS ALTERAÇÕES NO FUNDO AO LONGO DO TEMPO.....	92
TABELA 20 – SIMULAÇÕES REALIZADAS NO MODELO NUMÉRICO – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	97
TABELA 21 – PRESSÕES AO LONGO DA CRISTA DO VERTEDOURO E DA BACIA DE DISSIPAÇÃO – DIFERENÇAS MÁXIMAS E ERRO MÉDIO QUADRÁTICO – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \varepsilon$ RNG.....	112
TABELA 22 – PERFIL DA LINHA DE ÁGUA AO LONGO DO VERTEDOURO – DIFERENÇAS MÁXIMAS E ERRO MÉDIO QUADRÁTICO - $k - \varepsilon$ RNG.....	113
TABELA 23 – PRESSÕES AO LONGO DA CRISTA DO VERTEDOURO E DA BACIA DE DISSIPAÇÃO – DIFERENÇAS MÁXIMAS E ERRO MÉDIO QUADRÁTICO – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$	113
TABELA 24 – PERFIL DA LINHA DE ÁGUA AO LONGO DO VERTEDOURO – DIFERENÇAS MÁXIMAS E ERRO MÉDIO QUADRÁTICO – $k - \omega$	114
TABELA 25 – CORTE LONGITUDINAL NO VÃO CENTRAL DO VERTEDOURO - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E MODELO FÍSICO COM FUNDO MÓVEL	115
TABELA 26 – CORTE LONGITUDINAL NO VÃO CENTRAL DO VERTEDOURO - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E MODELO FÍSICO COM FUNDO MÓVEL – ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	122

LISTA DE SIGLAS

1D	Unidimensional;
2D	Bidimensional;
3D	Tridimensional;
ABRH	Associação Brasileira de Recursos Hídricos;
AHE	Aproveitamento Hidrelétrico;
ASCE	American Society of Civil Engineers;
CFD	Computational Fluids Dynamics;
DHI	DHI Group – Empresa Internacional do Setor Privado;
DNS	Direct Numerical Simulation;
CEHPAR	Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza;
FAVOR	Fractional Area/Volume Obstacle Representation;
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes;
RNG	Renormalized Group Model;
<i>RMS</i>	<i>Root Mean Square</i> , ou “erro quadrático médio”;
LACTEC	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento;
TRACTEBEL	Tractebel Energia S.A. – Empresa privada;
VOF	Volume of Fluid.

LISTA DE SÍMBOLOS

u, v, w	vetores de velocidade nas direções x, y e z respectivamente;
u', v', w'	flutuações de velocidade nas direções x, y e z respectivamente;
x, y, z	direções no espaço triortogonal;
ρ	densidade do fluido ou massa específica, em kg.m^{-3} ;
γ	peso específico da água;
t	tempo, em s;
g	aceleração da gravidade, em m/s^2 ;
μ	viscosidade dinâmica;
p	pressão;
Re	número de Reynolds;
Re^*	número de Reynolds de Corte;
k	energia cinética turbulenta;
ε	taxa de dissipação de energia cinética turbulenta;
$c_{\varepsilon 2}$	coeficiente obtido de forma explícita no modelo de fechamento turbulento $k - \varepsilon$ RNG;
ω	taxa de dissipação de energia turbulenta específica;
F	número de Froude;
u_τ	velocidade de cisalhamento;
κ	constante de Von Karman;
k_s	rugosidade segundo Nikuradse;
ν	viscosidade cinemática do fluido;
Y	profundidade do escoamento;
$u_{W\tau}$	tensão de arraste;
f_R	coeficiente para obtenção da rugosidade segundo Nikuradse a partir do diâmetro médio do tamanho do material de fundo;
d_{50}	diâmetro médio do tamanho do material de fundo;

τ	tensão de cisalhamento;
C_D	coeficiente de arraste;
B	constante igual a 0,71;
z_0	$k_s/30$;
h	profundidade do escoamento;
$\theta_{cr,n}$	tensão tangencial adimensional crítica;
$d_{*,n}$	diâmetro adimensional do sedimento da espécie 'n';
ρ_n	densidade do sedimento ou massa específica;
s_n	densidade relativa do sedimento em relação a água;
ϕ_n	ângulo de repouso do sedimento, em graus;
$\theta'_{cr,n}$	tensão tangencial adimensional crítica corrigida em função da declividade da superfície;
β	ângulo que o leito forma com a horizontal;
ψ	ângulo que o leito forma com o fluxo;
α_n	coeficiente de arraste do sedimento da espécie 'n';
$u_{arraste,n}$	velocidade de arraste, velocidade com que o sedimento deixa o leito do rio;
$u_{queda,n}$	velocidade de queda da partícula;
$u_{queda,n}^*$	velocidade de queda da partícula segundo Richardson-Zaki;
c_s	fração do volume de sedimentos em suspensão;
ζ	coeficiente de Richardson-Zaki;
Φ_n	taxa adimensional de transporte de fundo;
$\beta_{MPM,n}$	coeficiente empírico da equação de Meyer, Peter e Muller;
$\beta_{Nie,n}$	coeficiente empírico da equação de Nielsen;
$\beta_{VR,n}$	coeficiente empírico da equação de Van Rijn;
$c_{b,n}$	fração de material da espécie 'n' no leito;
$q_{b,n}$	taxa de transporte de fundo volumétrica em cada unidade de tempo por unidade de largura do leito do sedimento da espécie 'n';

δ_n	espessura do leito em que o sedimento da espécie 'n' pode saltar;
$u_{fundo,n}$	velocidade do transporte de fundo do sedimento da espécie 'n';
f_b	fração crítica de sedimento acondicionado;
$C_{s,n}$	concentração em massa de sedimento da espécie 'n';
$u_{s,n}$	velocidade do sedimento da espécie 'n' em suspensão;
\bar{u}	velocidade média da mistura;
$X_{físico,i}$	valor obtido no modelo físico;
$X_{simulado,i}$	valor obtido na simulação numérica;
m	metros;
mca	metros de coluna de água;
®	marca registrada comercial.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA	26
1.1.1	Objetivos Específicos	27
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1	EROSÕES A JUSANTE DE BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO	28
2.1.1	Fórmulas para estimativa da profundidade de erosão a jusante de bacia de dissipação	31
2.1.2	Mecanismos de Ruptura no Processo de Erosão em Maciços Rochosos Fraturados	33
2.2	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	38
2.2.1	Equações Governantes	39
2.2.2	Modelos de Turbulência	42
2.3	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E A MODELAGEM COMPUTACIONAL	44
2.3.1	Tensão de Cisalhamento no Leito	46
2.3.2	Critério de Shields	47
2.3.3	Arraste e Deposição	49
2.3.4	Modelos de Transporte de Sedimentos de Fundo	51
2.3.5	Modelo de Transporte de Sedimentos em Suspensão	52
2.4	ESTUDOS ANTERIORES	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1	ESTUDO DE CASO – AHE SÃO SALVADOR	58
3.2	MODELAGEM FÍSICA.....	59
3.3	MODELAGEM NUMÉRICA	64
3.3.1	Geometria da Estrutura Hidráulica.....	69
3.3.2	Malha de Volumes Finitos para Simulação Numérica	69
3.3.3	Condições de Contorno	73
3.3.4	Condições Iniciais do Fluido	76

3.3.5	Demais Parâmetros e Premissas Adotados na Simulação.....	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
4.1	SIMULAÇÕES COM FUNDO FIXO.....	80
4.1.1	Vazão	81
4.1.2	Pressões ao Longo da Crista do Vertedouro e da Bacia de Dissipação.....	83
4.1.3	Perfil da Linha de Água	86
4.1.4	Velocidades	88
4.2	SIMULAÇÕES COM FUNDO MÓVEL.....	89
4.2.1	Simulações com 50 minutos de duração	91
4.2.2	Simulações com 10 minutos de duração – Análise de Sensibilidade	97
4.3	ANALISE DOS RESULTADOS	99
5	CONSLUSÕES.....	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	APÊNDICE 1 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM CONSIDERAÇÃO DE FUNDO FIXO	112
	APÊNDICE 2 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM CONSIDERAÇÃO DE FUNDO MÓVEL E DURAÇÃO DE 50 MINUTOS.....	115
	APÊNDICE 3 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DO MODELO COM CONSIDERAÇÃO DE FUNDO MÓVEL E DURAÇÃO DE 10 MINUTOS.....	122
	APÊNDICE 4 – VELOCIDADES OBTIDAS NAS SIMULAÇÕES EM MODELO NUMÉRICO.....	148

1 INTRODUÇÃO

Vertedouros são estruturas extravasoras que têm por objetivo descarregar cheias com segurança durante a operação de um reservatório, ou seja, permitir a passagem do excedente de água evitando que haja o galgamento da estrutura de barramento e possibilitando a restituição do fluxo em condições compatíveis às condições naturais do rio a jusante do barramento. O projeto de um vertedouro pode ser dividido em duas etapas: a primeira consiste em se determinar o tipo e o tamanho aproximado da estrutura do vertedouro frente às condições locais; a segunda etapa consiste nas análises hidráulicas e estruturais detalhadas.

Na primeira etapa, uma avaliação da hidrologia, topografia e condições geológicas locais permitem definir o tipo e tamanho do vertedouro e da estrutura que fará a restituição do fluxo no leito do rio. Segundo Pinto (1987), a estrutura do vertedouro pode ser dividida em quatro principais componentes, são eles: estrutura de controle, canal de descarga, estrutura terminal e canais de aproximação e de restituição. Segundo Neidert (1980), a toda barragem se associa um desnível e a consequente aceleração dos escoamentos na sua transposição, originando-se fluxos de velocidade mais ou menos acentuadas, a menos que a energia seja parcialmente removida do sistema, como no caso das turbinas. É condicionante a escolha dos componentes do vertedouro que o fluxo do excedente de água seja restituído ao rio sem provocar danos às estruturas do aproveitamento e com velocidades compatíveis às condições de jusante. As erosões causadas pelo fluxo efluente aos vertedouros, nessa etapa, geralmente são realizadas através de métodos aproximados, desenvolvidos por meio de observações experimentais de laboratório e de campo.

Em uma segunda etapa, é realizado o detalhamento das condições hidráulicas e estruturais do vertedouro e seus componentes. O detalhamento hidráulico para estruturas de médios e grandes reservatórios geralmente são feitos em modelo físico. Atualmente, na grande maioria dos aproveitamentos, o estudo dessas estruturas em modelo físico é viabilizado em etapas avançadas de projeto, quando pequenos ajustes nos arranjos podem representar custos elevados e inviáveis tecnicamente, uma vez que parte da obra pode já estar construída.

A mudança no perfil típico dos novos aproveitamentos hidrelétricos, com baixas quedas em rios com grande volume de água, soluções de vertedouros com bacia de dissipação por ressalto hidráulico são bastante comuns. Essas estruturas terminais de vertedouros, embora o nome sugira a dissipação de energia como principal benefício, na realidade atuam como tranquilizadores do escoamento. Segundo Neidert (1980), o mais conveniente seria chamar tais estruturas de “bacia de transformação de energia”, uma vez que a energia cinética do escoamento é transformada em energia potencial, ou simplesmente “bacia de tranquilização” (*‘stilling basin’*, do inglês). Ainda assim, dependendo das características litológicas da região onde o fluxo da bacia de dissipação será restituído, a ação turbulenta do escoamento e as altas velocidades do fluxo podem provocar severas erosões, e, em alguns casos, causar danos à fundação das estruturas. Exemplos dessas ocorrências são as erosões observadas à jusante de estruturas extravasoras de Sobradinho (Brasil), apresentado na Figura 1, Wivenhoe (Austrália), apresentado na Figura 2 e Marimbondo (Brasil), apresentado na Figura 3.

FIGURA 1 – EROSÃO A JUSANTE DO VERTEDOIRO DE SOBRADINHO



FONTE: Pereira e Vasconcelos (2015)

FIGURA 2 – EROSÃO A JUSANTE DO VERTEDOIRO DE WIVENHOE DAM



FONTE: Bollaert e Lesleighter (2014)

FIGURA 3 – EROSÃO A JUSANTE DO VERTEDOIRO DE MARIMBONDO



FONTE: Carvalho (2010)

Frente às características geológicas do local onde será instalado o novo aproveitamento, possibilitado por investigações e sondagens realizadas na região de implantação do empreendimento, a previsão de erosão a jusante dessas estruturas em etapas anteriores à modelagem física pode auxiliar na adoção da melhor alternativa técnica para o projeto, sendo as alterações no projeto durante a etapa de investigações em modelo físico minimizadas.

Atualmente, com o aumento significativo da capacidade de processamento dos computadores, softwares de modelagem computacional de fluxos de fluidos apresentam ferramentas para resolução das equações de transporte de sedimento em fluxos unidimensionais (1D), bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D).

Soluções numéricas para problemas que envolvem o escoamento de sedimentos vêm sendo estudadas por muitos pesquisadores nas últimas décadas. Muitos modelos numéricos 2D e 3D têm sido desenvolvidos nos últimos anos. Esses modelos aplicam as fórmulas semi-empíricas para cálculo do Transporte de Sedimentos em Suspensão (*Suspended Load*), Sedimento de Fundo (*Bed Load*) e Transporte Total (*Total Load*). Como exemplo de modelos 2D com simulação do Transporte de Sedimento de Fundo (*Bed Load*) podem ser citados os modelos CCHE2D[®] (Jia e Wang, 1999), MIKE 21[®] (DHI, 1990) e SUTRENCH-2D[®] (Van Rijn, 1987), entre vários outros disponíveis. São exemplos de modelos 3D com simulação do Transporte de Sedimento de Fundo (*Bed Load*) os *softwares* SUSTRENCH-3D[®] (Van Rijn, 1987), CH3D-SED[®] (Spasojevic e Holly, 1993) e FLOW 3D[®] (Flow Science, 2015), esse último objeto de estudo da presente dissertação.

Diversos autores apresentaram estudos utilizando modelos numéricos para a determinação das profundidades de erosões ao redor de pilares de pontes com diferentes seções em escoamentos livres e pressurizados, a erosão em diques e a erosão causada por jatos submersos e por jatos verticais.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Esta dissertação tem por objetivo o estudo das erosões a jusante de vertedouros com bacia de dissipação por ressalto hidráulico utilizando as ferramentas de modelagem computacional do *software* FLOW 3D[®]. Os estudos serão pautados na comparação com os resultados de modelo físico obtidos para a

caracterização das erosões realizadas para o Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) São Salvador.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da dissertação são:

- análises do comportamento geral do escoamento ao longo da estrutura, como níveis de água, velocidades e pressões, de maneira qualitativa e quantitativa, através da comparação dos resultados obtidos no modelo numérico com os resultados do modelo físico previamente realizado.
- observação das erosões na região de restituição do fluxo da bacia de dissipação, cujo objetivo principal é avaliar qual a capacidade do software utilizado nas análises em reproduzir os valores encontrados no modelo físico.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para facilitar sua compreensão, a dissertação foi dividida em cinco capítulos. O Capítulo 1 expõe uma INTRUDUÇÃO ao assunto, abordando os objetivos e estrutura geral do trabalho. O Capítulo 2 apresenta a REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, buscando o embasamento necessário para o desenvolvimento da dissertação. O Capítulo 3 expõe os MATERIAIS E MÉTODOS adotados na pesquisa, descreve a ferramenta que será utilizada para cumprir com os objetivos propostos. Os RESULTADOS obtidos nas simulações numéricas e as DISCUSSÕES sobre os mesmos são apresentados no Capítulo 4, e por fim, no Capítulo 5 se apresentam as CONCLUSÕES dessa dissertação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os principais aspectos referentes a simulações matemáticas de escoamentos turbulentos com transporte de sedimentos. São apresentados os mecanismos que regem o fenômeno de erosão a jusante de fluxos turbulentos e discutidos aspectos sobre a dinâmica dos fluidos computacional e as equações que descrevem o fenômeno e permitem a resolução numérica desse tipo de problema, bem como as simplificações e modelos adotados nesta dissertação. Em seguida, é apresentado o método empírico para resolução de problemas envolvendo o escoamento de sedimentos e suas equações de transporte. Finalmente, é apresentado um panorama de estudos anteriores na resolução de problemas numéricos envolvendo transporte de sedimentos.

2.1 EROSÕES A JUSANTE DE BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO

A integridade das estruturas extravasoras de um aproveitamento hídrico, independente de qual for seu uso, deve ser mantida durante toda a vida útil do empreendimento. A restituição do fluxo dessas estruturas extravasoras (dentre elas os vertedouros) deve ser bem projetada dentro dos padrões aceitáveis de riscos.

Embora as bacias de dissipação tenham como principal função restituir o fluxo com características semelhantes ao escoamento natural do rio, com baixas velocidades, muitas vezes as características geológicas locais não permitem que isso seja feito com segurança, uma vez que o confinamento do fluxo e sua elevada energia tende a produzir altas velocidades nas regiões de restituição e oscilações de pressão significativas, acarretando o enfraquecimento do maciço e posterior fraturamento e deslocamento dos blocos.

Em empreendimentos de médio e grande porte, a tendência erosiva do fluxo a jusante dessas estruturas é estudada em modelo físico mediante a instalação de fundo móvel no leito do rio, geralmente com material granular e não coesivo. São muitos os estudos atuais com a adoção de material coesivo, entretanto a presente pesquisa se limita ao estudo com material não coesivo, onde os principais parâmetros do material são o ângulo de atrito e o diâmetro representativo dos blocos. A definição do material a ser empregado nesses ensaios deve passar por

uma análise da litologia local, observando-se a resistência à erosão do maciço, a tendência à formação de blocos quando submetido a esforços hidráulicos, os planos de estratificação do maciço, entre outras características geológicas, o que torna essa definição bastante complexa. Visando o embasamento necessário para essa definição, na seção 2.1.1 são apresentados os principais mecanismos de ruptura de maciços expostos a fluxos turbulentos.

Em empreendimentos de menor porte, ou mesmo para que se faça uma estimativa mais precisa dos efeitos do fenômeno de erosão previamente a ensaios em modelo físico, o uso de modelos matemáticos pode ser uma alternativa. Com o advento da capacidade de processamento dos computadores essas ferramentas tendem a dar uma resposta rápida, se comparados a construção e investigação nos modelos físicos, para os problemas encontrados em etapas do empreendimento onde ainda não é possível a realização de estudos em modelo físico.

Conforme descrito por Afzal (2013), três métodos são utilizados na resolução de problemas com transporte de sedimentos: soluções analíticas, estudos em modelos físicos e simulações numéricas.

Soluções analíticas são utilizadas na resolução de casos muito simples e normalmente não são aplicáveis em problemas práticos de engenharia. Conforme apresentado por Singh (2005), um dos modelos mais antigos foi desenvolvido por Tinney (1955), através da resolução analítica de uma equação 1D para simular a erosão do leito em um canal. Al-Khalif (1965) usou a abordagem de Einstein (1950) para desenvolver uma função de transporte de fundo, utilizando-a para descrever o processo de erosão de um canal. Gill (1983) utilizou, para simular as modificações no leito causadas pela deposição e erosão, um modelo analítico parabólico em um canal finito. Zhang e Kahawita (1987) propuseram um modelo de assoreamento parabólico não-linear e apresentaram a elevação do leito em função da raiz quadrada do tempo.

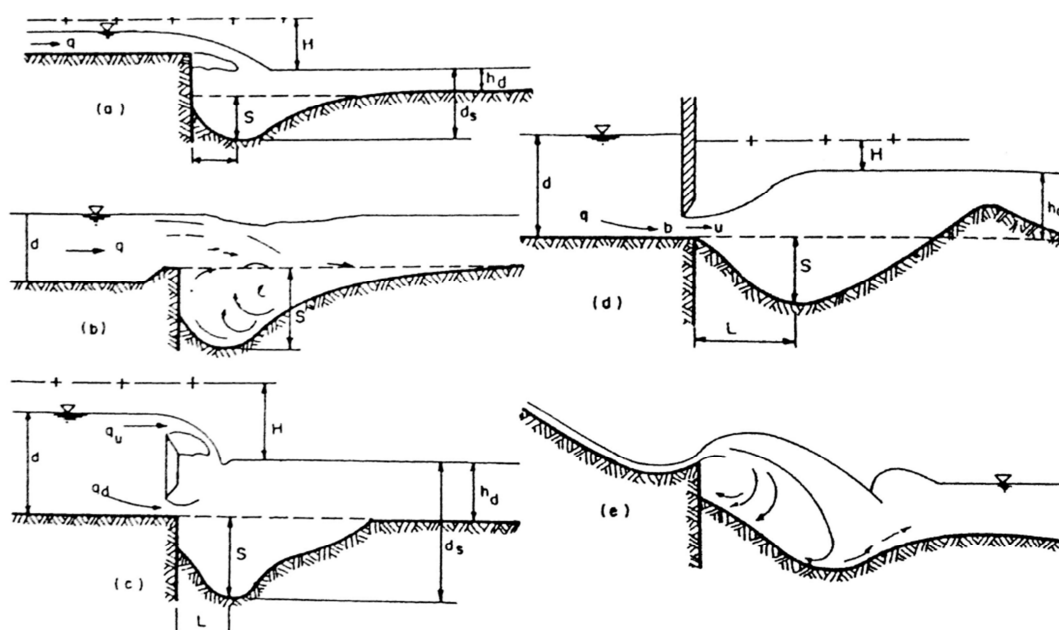
Soluções numéricas, em comparação a modelos físicos, possuem a vantagem de ser menos custosas e dispendiosas de tempo. De qualquer forma, resultados de modelos numéricos ainda dependem da validação através de experimentos físicos.

Ainda existem alguns métodos simplificados para estimativa das profundidades máximas de erosão a jusante de estruturas hidráulicas. Senturk

(1994) apresenta os possíveis tipos de escoamento a jusante de estruturas hidráulicas, ilustrados na Figura 4, e equações propostas para determinação da profundidade de erosão causadas pelo fluxo. Segundo Senturk (1994), não existe uma fórmula universal para o cálculo da profundidade de erosão nos fluxos mostrados na Figura 4, porém, autores como Schoklitsch (1951), Eggenberg (1943), Jäger (1939), Altinbilek e Okyay (1973), Stevens e Simons (1971) e Laursen (1980), entre outros, propuseram algumas soluções para esses tipos de problemas, sendo a profundidade de erosão (S), a distância a partir do final da estrutura ao ponto erodido mais profundo (L) e a distância entre a superfície de água e o ponto mais profundo (d_s) definidos a partir da vazão específica (q), lâmina de água a montante (d), lâmina de água a jusante (h_d) e carga hidráulica (H).

No esquema (a) da Figura 4 são apresentadas as variáveis utilizadas no cálculo de erosões causadas por jatos horizontais. Já no esquema (b) são apresentadas as variáveis para o cálculo da profundidade de erosão a jusante de bacia de uma estrutura terminal de bacia de dissipação de vertedouro. O esquema (c) apresenta as variáveis para cálculo da profundidade de erosão causada pela combinação de um jato horizontal submerso e um jato de uma soleira delgada. O esquema (d) apresenta as variáveis utilizadas para cálculo da profundidade de erosão causada por jatos horizontais, e, por fim, o esquema (e) apresenta as variáveis para cálculo da profundidade de erosão causada por um jato proveniente de um salto de ski.

FIGURA 4 – TIPOS DE ESCOAMENTO A JUSANTE DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS



FONTE: Senturk (1994)

Segundo Infanti e Brito (2010), em geral, nenhuma ou pouca atenção é dada ao estudo dos maciços rochosos para a previsão da erosão causada por vertedouros e na tendência de evolução dessas erosões, por ser esse ramo considerado eminentemente da engenharia hidráulica, sendo o único parâmetro geomecânico considerado nesses estudos o tamanho dos blocos de rocha. Embora o processo hidráulico seja de grande complexidade, o problema principal pode-se resumir na previsão da profundidade de erosão. Ainda segundo Infanti e Brito (2010), a aplicação de sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos para previsão de problemas de erosão por fluxo turbulento de água a jusante de vertedouros é relativamente recente.

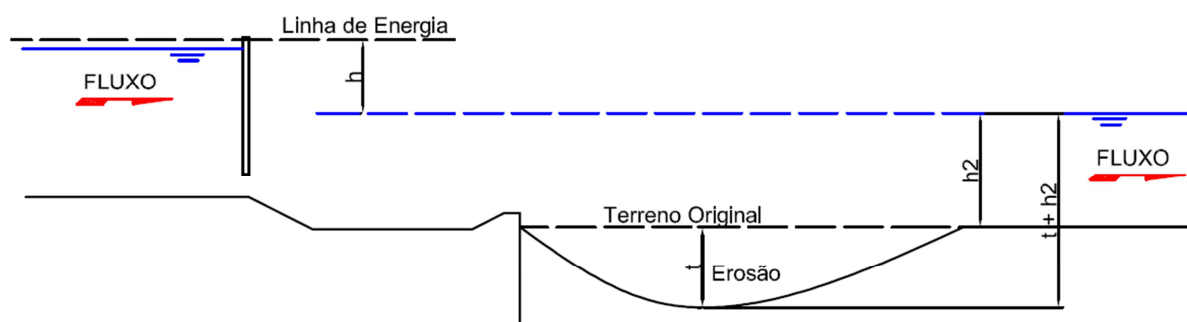
2.1.1 Fórmulas para estimativa da profundidade de erosão a jusante de bacia de dissipação

Diversos autores desenvolveram fórmulas para a estimativa da profundidade de erosão a jusante de bacia de dissipação de estruturas vertentes. Segundo Whittaker & Schleiss apud Novak (1984), uma aproximação para a determinação da profundidade de erosão a jusante de bacias de dissipação pode ser realizada através das fórmulas desenvolvidas por autores como Veronese, Jaeger, Smoljanivov e Schoklitsch para a estimativa da profundidade de erosão causada por

jatos verticais, sendo que a profundidade de erosão a jusante de bacias de dissipação resultam em torno de 50% menores que as profundidades estimadas para jatos verticais, em função da forma de impacto do jato efluente.

Novak (1961) e Catakli et al. (1973) propuseram uma formulação para a estimativa das profundidades de erosão a jusante de bacias de dissipação por ressalto hidráulico. As variáveis dessas equações são apresentadas na Figura 5.

FIGURA 5 – VARIÁVEIS DAS EQUAÇÕES PROPOSTAS POR NOVAK (1961) E CATAKLI ET AL. (1973)



FONTE: O autor (2017)

Novak (1961) propôs:

$$t + h_2 = k \left[6h^{0,25} q^{0,5} \left(\frac{h}{d_m} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (2-1)$$

onde t é a profundidade de erosão, h_2 é a altura da coluna de água na região, k é um coeficiente que varia em função da submergência do ressalto hidráulico, h é a diferença entre os níveis a montante do vertedouro e a jusante da bacia de dissipação, q é a vazão por unidade de largura e d_m é o diâmetro médio do material.

Catakli et al. (1973) propôs:

$$t + h_2 = k \frac{q^{0,6} (h + h_2)^{0,2}}{d_{90}^{0,1}} \quad (2-2)$$

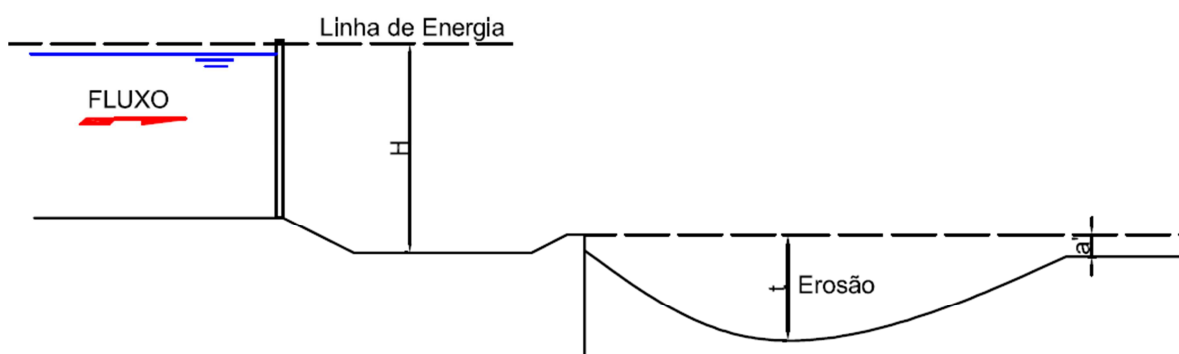
onde k é igual a 1,62 quando a bacia de dissipação não conta com um defletor (*end-sill*) ao final da mesma ou varia de 1,42 a 1,53 dependendo da forma do defletor e d_{90} é o diâmetro de 90% dos blocos.

Schoklitsch (1951) propôs uma formulação para a estimativa da profundidade de erosão a jusante de bacias de dissipação válida somente para escala de modelo:

$$t = 4,5\alpha\beta\left(\frac{b}{B_2}\right)^{0,25} z^{1,6}H^{0,5}q^{0,33} + 2,15\alpha' \quad (2-3)$$

em que $\frac{b}{B_2}$ é a razão entre a largura da crista do vertedouro, incluindo os pilares, e a largura do canal de jusante, α é um coeficiente em função do formato da bacia de dissipação e β é um coeficiente dependente do tipo de operação das comportas do vertedouro, levando em conta se a operação é simétrica ou assimétrica. A Figura 6 apresenta as variáveis da equação proposta por Schoklitsch (1951).

FIGURA 6 – VARIÁVEIS DA EQUAÇÃO PROPOSTA POR SCHOKLITSCH (1951).



FONTE: Adaptado de Whittaker & Schleiss (1984)

2.1.2 Mecanismos de Ruptura no Processo de Erosão em Maciços Rochosos Fraturados

Segundo Pinto (2011), o comportamento mecânico e hidráulico de um determinado maciço rochoso é função das propriedades da rocha intacta e das descontinuidades nela presentes. Exceto em maciços com alto grau de permeabilidade, como o maciço intacto se apresenta menos deformável e permeável de modo geral, as descontinuidades regem as propriedades mecânicas e hidráulicas do maciço. As descontinuidades e fraturas planares modificam o comportamento da rocha devido à distribuição aleatória das mesmas, gerando uma considerável anisotropia nas propriedades do maciço. Sendo assim, a caracterização do maciço

rochoso não é simples, pois estes se apresentam como um meio descontínuo, anisotrópico e heterogêneo (PINTO, 2011), conforme exemplificado na Figura 7, Figura 8 e Figura 9.

FIGURA 7 – MACIÇO ROCHOSO HETEROGÊNEO – UHE SINOP



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 8 – DEMARCAÇÃO DAS FALHAS GEOLÓGICAS A JUSANTE DE UMA ESTRUTURA HIDRÁULICA



FONTE: Bollaert, Vrchoticky e Falvey (2006)

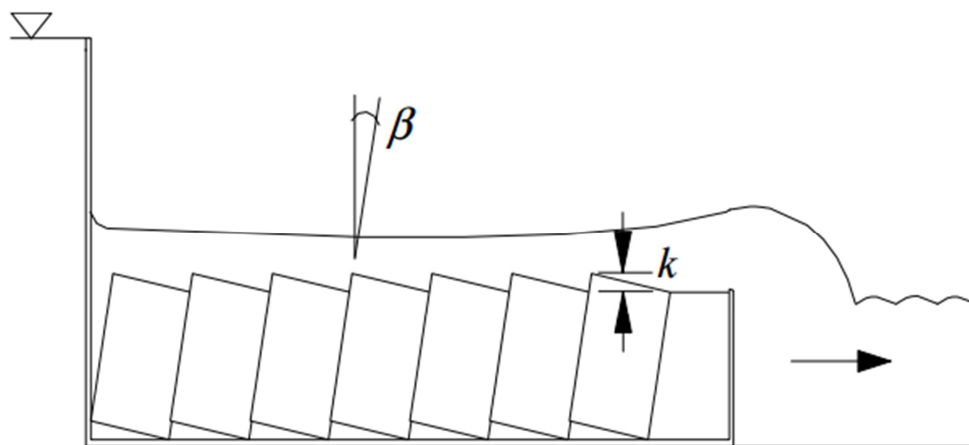
FIGURA 9 – FISSURAS NO MACIÇO ROCHOSO A JUSANTE DE UMA ESTRUTURA HIDRÁULICA APÓS PASSAGEM DE UMA CHEIA – BARRAGEM DE COPETOW



FONTE: Bollaert e Lesleighter (2014)

Reinius (1986) realizou estudos em modelo físico sobre a erosão em meios fraturados artificiais que ocorre a partir de um fluxo paralelo à superfície, como é o caso de fluxos a jusante de bacias de dissipação. Na Figura 10 é apresentado um esquema dos ensaios realizados por Reinius (1986). Nesse estudo, Reinius (1986) conclui que o mecanismo de desestabilização desses blocos está ligado à ação da alta velocidade do fluxo diretamente sobre as protuberâncias presentes nos blocos (k) e, em seguida, passando para o interior do meio através das descontinuidades. Sendo assim, esse mecanismo é função da forma e do grau de embricamento dos blocos.

FIGURA 10 – ESQUEMA DOS EXPERIMENTOS DE REINIUS



FONTE: Reinius (1986)

Segundo Pinto (2011), o efeito de flutuações de pressão é apontado como o principal agente no desalojamento dos blocos, dependendo do estado de pré-fraturamento da rocha. Pinto (2011) destaca que os mais significativos mecanismos de erosão são a remoção do bloco, o fraturamento do maciço rochoso ou de blocos já formados e a abrasão do maciço rochoso ou de blocos, cada um desses ocorrendo na sua escala de tempo, sendo que as correntes de retorno ou recirculações podem apresentar uma causa agravante nesse mecanismo.

Pinto (2011) define o mecanismo de fraturamento da rocha em três etapas. Primeiramente, ocorre o enfraquecimento da rocha devido ao intemperismo e impacto do fluxo turbulento. Segundo Pinto (2011), o fraturamento frágil ocorre de forma instantânea e geralmente resulta da quebra da massa rochosa, passando a formar blocos distintos, ou em caso de blocos já existentes, estes se quebram em pedaços menores.

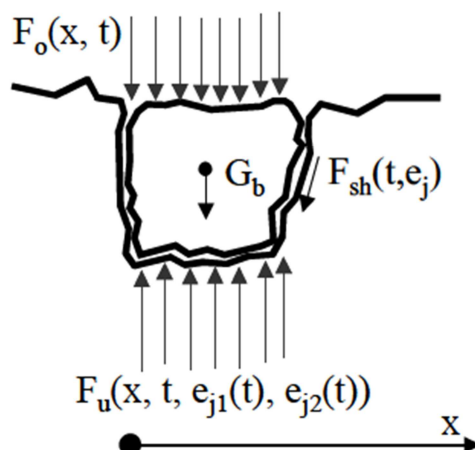
Posteriormente, durante situações de fluxo turbulento, os blocos de rocha localizados na região de interface água-rocha podem ser ejetados ou deslocados para jusante. Conforme descrito por Bollaert (2002), os blocos característicos, formados pela intersecção das juntas num espaço bidimensional, são submetidos a forças que variam com o tempo. Essas forças podem ser classificadas como forças estabilizadoras e desestabilizadoras, sendo a aceleração provocada pelo desequilíbrio entre essas forças a principal causa da ejeção do bloco de rocha.

Segundo Bollaert (2002), são forças estabilizadoras o peso do bloco, definido na Figura 11 por G_b , a força relativa à pressão resultante agindo na superfície do bloco, definida por $F_o(x,t)$ e a força relativa ao atrito entre os blocos, ou o bloco característico e o maciço rochoso, definida por $F_{sh}(t, e_j)$. A força $F_o(x,t)$ varia ao longo do tempo e espaço, e é resultante dos efeitos macroturbulentos do fluxo, podendo assim atingir valores negativos, tornando-se uma força desestabilizadora. A força $F_{sh}(t, e_j)$ depende de parâmetros como rugosidade dos blocos e maciço, espessura da abertura das juntas, material de enchimento das juntas, etc. e também é variável no tempo.

Como força desestabilizadora, atua a força relativa à subpressão, definida por $F_u(x, t, e_{j1}(t), e_{j2}(t))$, dependente do tempo, espaço e espessura das juntas entre os blocos.

A Figura 11 sintetiza as forças atuantes apresentadas anteriormente.

FIGURA 11 – DIAGRAMA DE FORÇAS ATUANTES EM UM BLOCO DE ROCHA



FONTE: Bollaert (2002) apud (Bollaert e Schleiss, 2001b)

Bollaert (2002) aponta no seu estudo a importância das flutuações de pressões instantâneas na ejeção do bloco. Casos de danos sob o efeito de flutuações de pressões instantâneas foram observados nos vertedouros das barragens de Malpaso (México), Tarbela (Paquistão) e Karnafuli (Índia) durante a operação na passagem de cheias com presença de ressalto hidráulico.

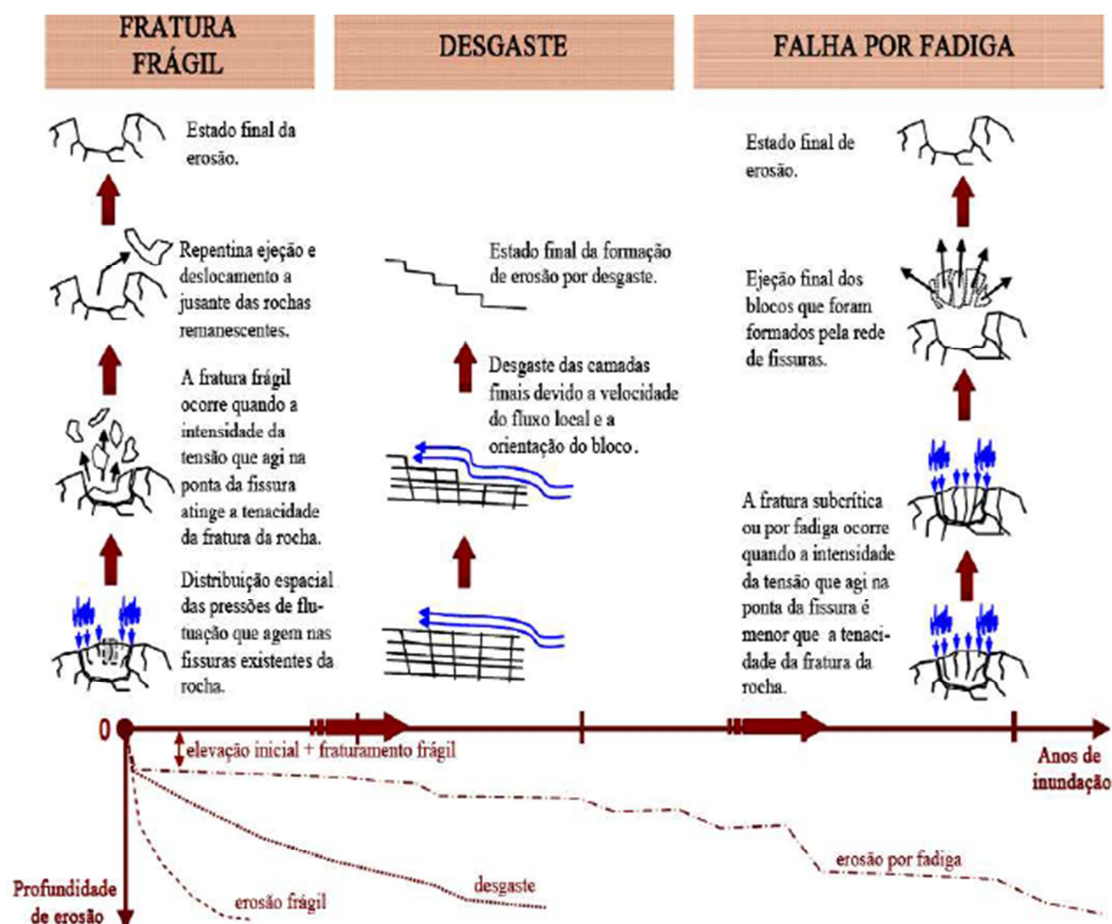
Bollaert (2002) conclui que a propagação das ondas de pressão no interior das juntas não acontecem instantaneamente, mas os campos de pressão sobre e sob os blocos e lajes são dependentes e devem ser correlacionados.

Durante o processo de ejeção ocorre simultaneamente o desgaste de blocos de superfícies horizontais que possuam certa protrusão em consequência de forças de arraste e forças ascendentes nas faces expostas do bloco. Se os blocos não podem ser ejetados ou deslocados para jusante, instantaneamente fraturado ou desgastado da camada superficial, estes podem erodir pelo fraturamento progressivo até formarem pequenos pedaços. Tal processo é chamado de falha por fadiga.

A Figura 12 apresenta um resumo dos mecanismos de erosão. Conforme pode ser observado, cada um dos processos de erosão ocorre na sua escala de tempo, sendo o fraturamento frágil instantâneo a partir da submissão dos blocos ao fluxo turbulento com rápida estabilização das erosões. Já o desgaste dos blocos ocorre ao longo do tempo, de maneira mais lenta que o fraturamento frágil. A falha

por fadiga ocorre quando os blocos são submetidos repetidas vezes a esforços desestabilizantes.

FIGURA 12 – MECANISMOS DE RUPTURA DE MACIÇOS ROCHOSOS SUBMETIDOS A ESCOAMENTO TURBULENTO



Fonte: Pinto (2011) apud Bollaert (2002)

2.2 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*) é uma área da ciência que tem por finalidade a resolução numérica por métodos computacionais para problemas que envolvem o escoamento de fluidos, seja em estado líquido ou gasoso.

Segundo apresentado por Araújo Filho (2014), a utilização de programas computacionais para simular numericamente o fluxo através de estruturas hidráulicas, é, em muitos aspectos, semelhante à criação de um modelo físico: se o modelo físico, ou numérico, não está configurado corretamente para simular uma

determinada situação, os resultados obtidos não irão representar fielmente a realidade.

Araújo Filho (2014) apresenta como um dos principais benefícios no uso de CFD na resolução de problemas de engenharia a facilidade na extração de resultados e a disponibilidade desses dados em todos os pontos do domínio em estudo. Enquanto em um modelo físico o processo de medição deve ser meticuloso e, por essa razão, dispendioso em tempo, no modelo numérico todas as variáveis em todos os pontos do escoamento estão disponíveis para análise, fazendo com que a visão e entendimento do escoamento como um todo fiquem facilitados (JOHNSON, 2006). Contudo, a modelagem computacional de um determinado problema requer que o usuário conheça, com certo grau de profundidade, a teoria envolvida na resolução do problema.

2.2.1 Equações Governantes

Conforme apresentado por Blazek (2001), as equações dos fluidos são baseadas nas leis de conservação: lei de conservação de massa e lei de conservação da quantidade de movimento.

Ainda segundo Blazek (2001), o movimento dos fluídos, ou fluxo, em geral pode ser decomposto em duas partes distintas: uma devido ao transporte convectivo, e outra devido ao movimento molecular presente no fluido em repouso, essa de natureza difusora.

Os fluidos escoam de forma tridimensional, ou seja, as propriedades do fluxo variam em todas as direções e o campo de velocidades é função das coordenadas de posição e do tempo. Em fluidos newtonianos, ou seja, que obedecem a Lei da Viscosidade de Newton, o valor da viscosidade dinâmica (μ) é constante. Para o caso de fluido incompressível e com viscosidade constante as formulações resultam em um conjunto de equações conhecidas como Equações de Navier-Stokes [(2-5), (2-6) e (2-7)], que adicionadas à equação da continuidade (2-4), descrevem o comportamento de um fluido.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2-5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2-6)$$

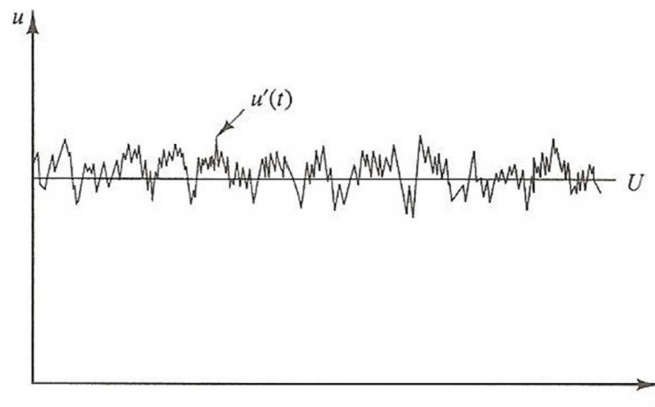
$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2-7)$$

Segundo apresentado por Blazek (2001), a solução desse conjunto de equações no caso de fluidos ideais (não viscosos) e fluxos laminares não apresentam dificuldades.

Já em um fluxo turbulento, a resolução direta da turbulência pelas equações de Navier-Stokes (conhecidas por simulações DNS – ‘*Direct Numerical Simulation*’, *do inglês*) somente é possível para caso de fluxos bastante simples com número de Reynolds (Re) baixos. Blazek (2001) apresenta que o número de pontos do domínio para uma adequada resolução espacial em uma simulação DNS deve ser da ordem de $Re^{9/4}$, ou seja, para um escoamento turbulento típico em obras hidráulicas, com número de Reynolds da ordem de 10^7 , seria necessária a resolução das equações de Navier-Stokes em 10^{16} pontos do domínio.

Dessa forma, é usual a utilização da chamada decomposição de Reynolds, que se trata das Equações de Navier-Stokes reescritas em termos de quantidades médias de velocidade e pressão. Essa aproximação apresentada por Reynolds em 1885 propõe a decomposição das propriedades do escoamento considerando uma parcela média e uma parcela que corresponde à flutuação turbulenta, conforme exemplificado na Figura 13 e descrito nas equações (2-8), (2-9), (2-10) e (2-11).

FIGURA 13 – MEDIÇÃO TÍPICA DE VELOCIDADE NUM ESCOAMENTO TURBULENTO



FONTE: Araújo Filho (2014)

$$u(t) = U + u' \quad (2-8)$$

$$v(t) = V + v' \quad (2-9)$$

$$w(t) = W + w' \quad (2-10)$$

$$p(t) = P + p' \quad (2-11)$$

onde u , v e w são as componentes da velocidade, p é a pressão e t é o tempo.

As equações obtidas a partir da decomposição de Reynolds associadas às equações de Navier-Stokes, resultam nas chamadas equações de Navier-Stokes com média de Reynolds [(2-12), (2-13) e (2-14)], conhecidas pelo termo em inglês “RANS - *Reynolds Avaraged Navier-Stokes*”.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} + w \frac{\partial U}{\partial z} \\ = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2-12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \\ = g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2-13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} + u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} + w \frac{\partial W}{\partial z} \\ = g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) \\ - \left(\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2-14)$$

As equações RANS são semelhantes às equações de Navier-Stokes, o que difere é o aparecimento de novos termos que representam a influência das flutuações turbulentas no escoamento. Tais termos criam a necessidade de equações adicionais para resolver o problema, as quais são fornecidas pelos chamados modelos de turbulência (ou fechamento), para os quais existem várias formulações dependendo do problema que se está analisando.

2.2.2 Modelos de Turbulência

Segundo apresentado por Blazek (2001), existem basicamente dois tipos de escoamento para um fluido viscoso: laminar e turbulento. Nos escoamentos laminares, as camadas adjacentes do fluxo deslizam uma sobre as outras, ordenadamente, fazendo com que para uma dada condição de contorno, o escoamento não apresente variações temporais de suas características. Para esse tipo de escoamento as soluções das equações de Navier-Stokes não apresentam grandes dificuldades.

Já em escoamentos turbulentos, a solução desse grupo de equações é um problema mais complexo. No escoamento turbulento as propriedades do escoamento como velocidade, temperatura e pressão estão sujeitas a flutuações no espaço e no tempo. Por isso, para se aproximarem da realidade os modelos de turbulência devem ser capazes de considerar e representar estes fatos.

Segundo Veerstedt (1995) apud Araújo Filho (2014) a turbulência pode ser vista como a combinação de vórtices aleatórios e instáveis que possuem tamanhos variando desde a ordem de grandeza do escoamento (escala integral), como por exemplo, o diâmetro de uma tubulação, até vórtices de dimensões de décimo ou centésimo de milímetros (10^{-5} metros).

Conforme apresentado por Henderson (1966), o número de Reynolds (Re) é o parâmetro que serve para classificar o tipo do escoamento, em laminar ou turbulento. Quando Re é menor que 2300, o escoamento é classificado como laminar. Quando Re é maior que 4000, o escoamento é classificado como turbulento. Não é possível definir com exatidão a transição do escoamento, pois essa depende do grau de perturbação do mesmo. Por isso, é definida uma faixa de transição ($2300 < Re < 4000$).

Segundo Bates et al. (2005), existem muitos modelos de turbulência, cujo critério de classificação está relacionado ao número de equações de transporte consideradas sendo que os modelos mais simples são aqueles que não utilizam equações de transporte.

Modelos deste tipo usam basicamente o conceito de viscosidade turbulenta proposto por Boussinesq em 1877. Existem ainda os modelos de turbulência com uma equação de transporte, que é o caso do modelo proposto por Prandtl (1925).

A partir do conceito de Prandtl (1925) surgiram outros modelos de turbulência, com duas equações de transporte, capazes de simular a turbulência de um escoamento de forma mais genérica e com bons resultados. Os modelos com duas equações utilizam a equação de transporte para a energia cinética de turbulência por unidade de massa (k), e outra equação para outra variável auxiliar.

Segundo Bates et al. (2005), dentre os modelos de turbulência de duas equações, o mais utilizado é o chamado modelo $k - \varepsilon$, proposto por Launder e Spalding em 1972, que simula a viscosidade turbulenta através de duas equações diferenciais parciais, uma para a energia cinética turbulenta (k), e outra para a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (ε), sendo que ε aparece naturalmente na equação de k . Bates et al. (2005) ainda apresenta que a principal falha no modelo $k - \varepsilon$ é a hipótese de isotropia nas flutuações turbulentas, o que pode produzir uma grande viscosidade turbulenta.

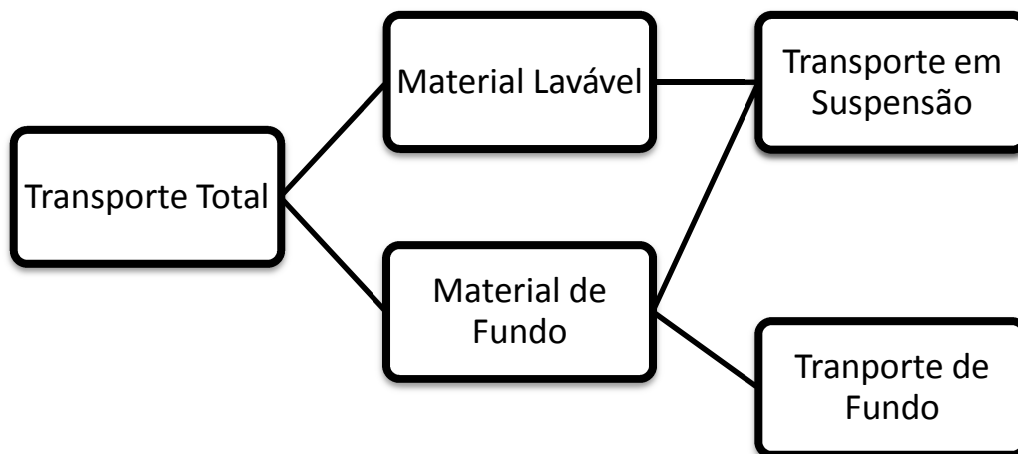
Há ainda o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG desenvolvido por Yakhot e Orszag (1986), conforme apresentado por Bates et al. (2005) que baseia-se na teoria da renormalização de grupos e apresenta as mesmas equações para a energia cinética turbulenta e para a taxa de dissipação turbulenta do modelo $k - \varepsilon$, porém utiliza um coeficiente $c_{\varepsilon 2}$ definido de forma explícita através de equações, enquanto que no modelo $k - \varepsilon$ padrão, os coeficientes são obtidos de forma empírica. Segundo Bates et al. (2005) este modelo é capaz de descrever com precisão os escoamentos turbulentos de baixa intensidade e regiões com fortes tensões.

Um terceiro modelo de duas equações é o modelo $k - \omega$, que, segundo Blazek (2001), tem sido muito utilizado na resolução de problemas de engenharia. Segundo Blazek (2001), nesse modelo, como no $k - \varepsilon$, é simulada a viscosidade turbulenta através de duas equações diferenciais parciais, uma para a energia cinética turbulenta (k), e outra para a taxa de dissipação de energia turbulenta específica (ω), que determina a escala de turbulência. A viscosidade turbulenta é calculada se utilizando k e ω . Segundo Bates et al. (2005), o modelo $k - \omega$ tende a ser mais preciso na região da camada limite ou em fluxos de transição quando comparado ao modelo $k - \varepsilon$.

2.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E A MODELAGEM COMPUTACIONAL

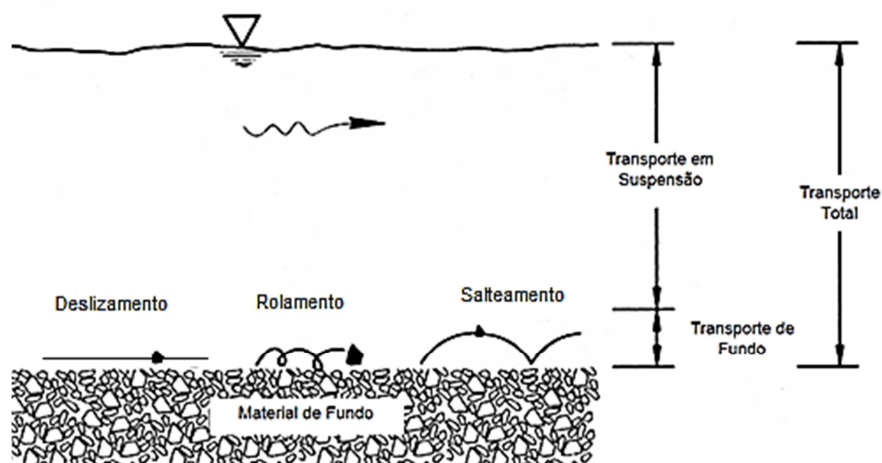
Em regiões onde a gravidade exerce um esforço predominante sob as partículas sólidas presentes no escoamento, essas se depositam junto à superfície do leito, num processo chamado de deposição. Quando o leito do rio não é capaz de resistir aos esforços tangenciais causados pelo escoamento, as partículas sólidas do leito são transportadas para outras regiões. Esse processo é chamado de erosão. O modo com que essas partículas são transportadas depende da relação entre a velocidade de sedimentação ou velocidade de queda do sedimento e a velocidade de cisalhamento crítica (*'critical shear velocity'*, do inglês). Com base nessa relação, o sedimento pode ser transportado sob duas formas: em suspensão (do inglês, *'suspended load'*) e transporte de fundo (do inglês, *'bed load'*), conforme pode ser observado na Figura 14. Diz-se que a partícula está em suspensão quando após a erosão ela é transportada pelo fluido a uma determinada distância do leito. O transporte de fundo é definido pelo rolamento, pelos movimentos de saltos e o pelo deslizamento das partículas sobre o leito. A Figura 15 exemplifica o transporte de sedimentos em meio a um fluido nas fases suspensa e de fundo.

FIGURA 14 – TRANSPORTE DE SEDIMENTOS



FONTE: O autor (2017)

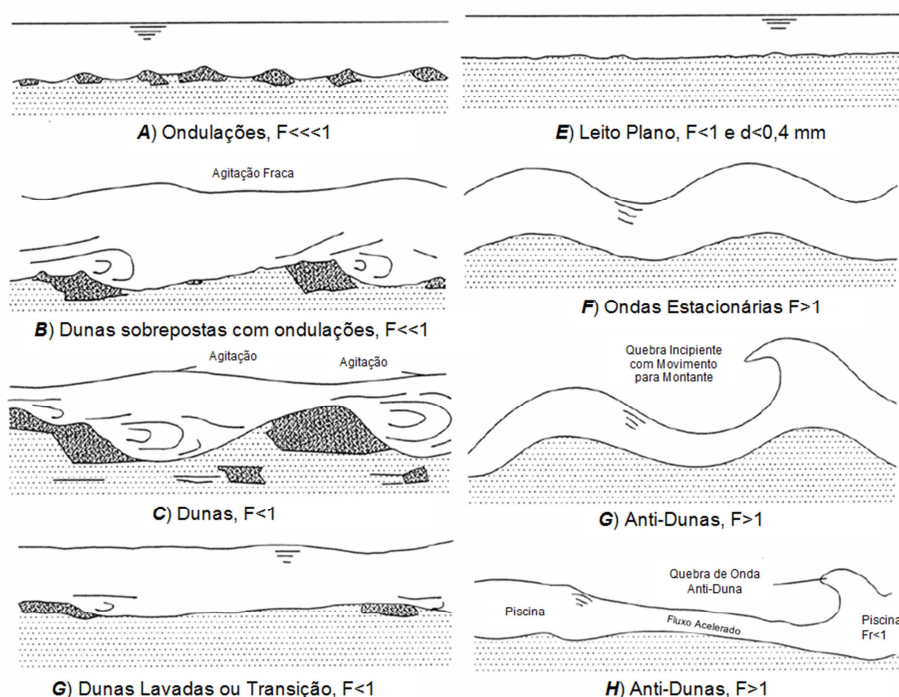
FIGURA 15 – ESQUEMA DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM MEIO A UM FLUIDO



FONTE: adaptado de Morris e Fan (1997)

As características de forma dos leitos fluviais, segundo apresentado por Bettés (2008), estão intimamente relacionadas à resistência do leito ao escoamento e ao transporte de sedimentos em um canal. A Figura 16 ilustra as classificações do leito em função das suas características de forma. Conforme apresentado na Figura 16, tais classificações estão relacionadas ao número de Froude do escoamento, representado por F .

FIGURA 16 – CLASSIFICAÇÃO DO LEITO QUANTO À SUA FORMA



FONTE: adaptado de Bettés (2008)

Com o aumento significativo da capacidade de processamento dos computadores, softwares de modelagem computacional de fluxos de fluidos apresentam ferramentas para resolução das equações semi-empíricas para cálculo do Transporte de Sedimentos em Suspensão (*Suspended Load*), Sedimento de Fundo (*Bed Load*) e Transporte Total (*Total Load*) dos modelos de transporte de sedimento. Na presente dissertação será utilizado o *software* FLOW 3D® (Flow Science, 2015).

O *software* FLOW 3D® tem a capacidade de calcular o transporte de até dez tipos de sedimento não-coesivos com diferentes propriedades, como diâmetro do bloco, densidade, ângulo de repouso e parâmetros de estabilidade, estimando o movimento de sedimentos a partir da erosão, advecção e da deposição, considerando assim a existência do sedimento nas formas suspensa e depositado no leito (definido pelo termo inglês “*packed sediment*”). Nos capítulos seguintes são apresentadas as equações e as definições dos termos utilizados no cálculo pelo *software* adotado.

2.3.1 Tensão de Cisalhamento no Leito

A tensão de cisalhamento no leito é a tensão aplicada pelo fluido no material de fundo, calculada para escoamentos tridimensionais através da função parede (*‘wall function’*):

$$u_{w\tau} = u_\tau \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{Y}{\frac{\nu}{u_\tau} + k_s} \right) \right] \quad (2-15)$$

onde $u_{w\tau}$ é a tensão de arraste, u_τ é a velocidade de cisalhamento, dada por $\sqrt{\tau_0/\rho}$, κ é a constante de Von Karman, igual a 0,4, ν é a viscosidade cinemática do fluido e k_s é a rugosidade do fundo/leito segundo Nikuradse.

Nesse modelo, a rugosidade do leito é obtida em função do tamanho dos blocos do material de fundo e é dada por:

$$k_s = f_R \times d_{50} \quad (2-16)$$

em que f_R é um coeficiente que relaciona a rugosidade do fundo com o diâmetro médio do material de fundo d_{50} , adotado igual a 2,5.

Em escoamentos de águas rasas, a lei quadrática do atrito é utilizada para avaliar a tensão de cisalhamento no leito:

$$\tau = \rho C_D \bar{v} |\bar{v}| \quad (2-17)$$

sendo que ρ é a densidade do fluido, \bar{v} é a velocidade média do escoamento, C_D é o coeficiente de arraste que pode ser definido pelo usuário ou calculado em função da rugosidade, pela equação apresentada por Soulsby (1997):

$$C_D = \left[\frac{\kappa}{B + \ln(z_0/h)} \right]^2 \quad (2-18)$$

onde B é constante e igual a 0,71, z_0 é definido por $k_s/30$ e h é a profundidade do escoamento.

2.3.2 Critério de Shields

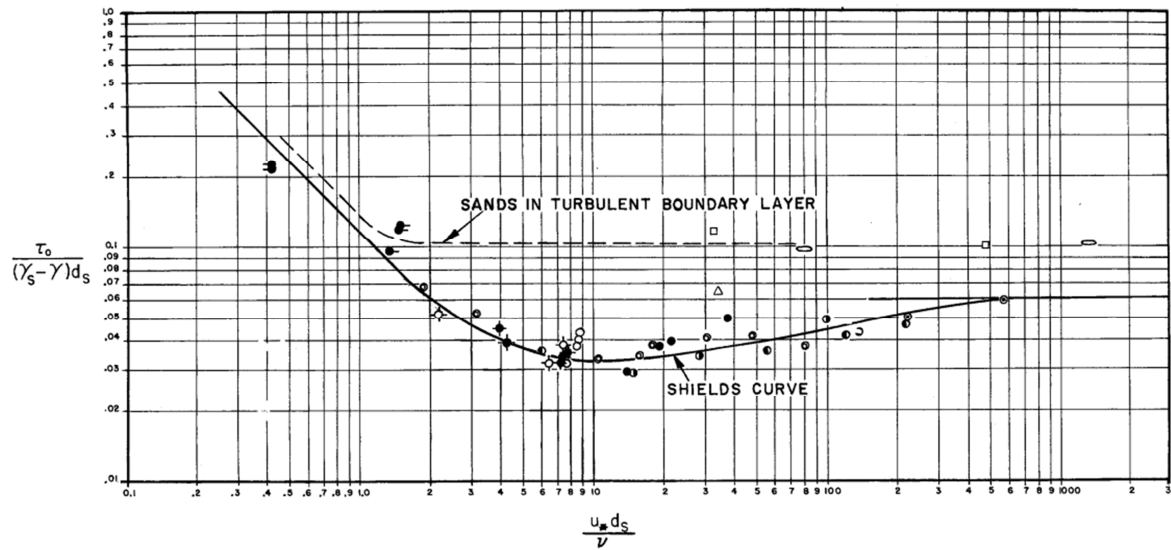
O parâmetro de Shields é uma forma adimensional de se expressar a tensão de cisalhamento no leito, definido por:

$$\theta_n = \frac{\tau_0}{g d_n (\rho_n - \rho)} \quad (2-19)$$

onde, g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), d_n é o diâmetro médio do material de fundo da espécie 'n', em metros, ρ_n é o peso específico do sedimento da espécie 'n' e ρ é o peso específico do fluido.

O parâmetro crítico de Shields é utilizado para definir a tensão crítica de cisalhamento, que quando superada, representa o início do movimento do sedimento. A relação entre o parâmetro crítico de Shields e o número de Reynolds de Corte (Re^*) foi proposta por Shields (1936) com base em resultados experimentais. Vanoni (1964) apresentou uma complementação para a curva apresentada por Shields (1936) para partículas menores (menores números de Reynolds de Corte). A curva final obtida é apresentada na Figura 17.

FIGURA 17 – DIAGRAMA DE SHIELDS



FONTE: Vanoni (1964)

O início do transporte se dá quando a condição crítica é atingida. Segundo Henderson (1966), essa condição não é repentina, mas pode ser interpretada como uma situação inicial onde ocorre o movimento de uma primeira partícula, e, progressivamente mais partículas são movimentadas, até que o movimento se torna geral.

A tensão crítica de cisalhamento é definida por:

$$\theta_{cr,n} = \frac{\tau_{cr,n}}{g d_n (\rho_n - \rho)} \quad (2-20)$$

O parâmetro crítico de Shields também pode ser calculado pela equação de Soulsby-Whitehouse, apresentada por Soulsby (1997):

$$\theta_{cr,n} = \frac{0,3}{1 + 1,2 d_{*,n}} + 0,055(1 - e^{-0,02 d_{*,n}}) \quad (2-21)$$

sendo $d_{*,n}$ o tamanho adimensional do sedimento da espécie 'n', obtido por:

$$d_{*,n} = d_n \left[\frac{g(s_n - 1)}{v_f^2} \right]^{1/3} \quad (2-22)$$

onde s_n é a densidade relativa do sedimento, em relação à água, adimensional, e v_f é a viscosidade cinemática do fluido.

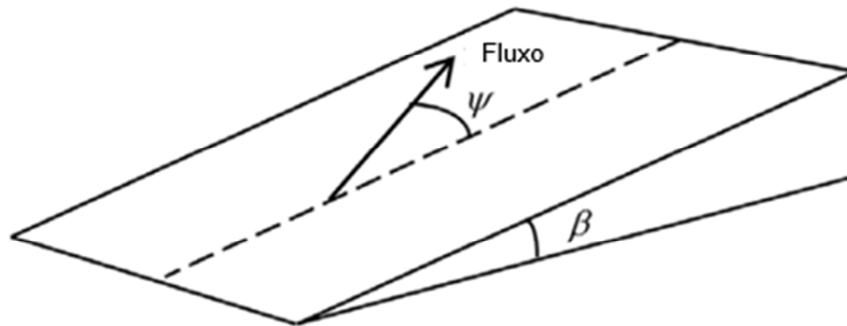
Em uma região onde o leito é inclinado, a aceleração gravitacional faz com que surja uma componente de força tangencial tornando o material de fundo mais ou

menos estável de acordo com a direção do fluxo. Se o fluxo está subindo o plano, a tensão crítica de cisalhamento é aumentada, enquanto se o fluxo está descendo, a tensão crítica de cisalhamento é reduzida. Tal efeito pode ser avaliado através da equação apresentada por Soulsby (1997):

$$\theta'_{cr,n} = \theta_{cr,n} \frac{\cos \psi \sin \beta + \sqrt{\cos^2 \beta \tan^2 \phi_n - \sin^2 \psi \sin^2 \beta}}{\tan \phi_n} \quad (2-23)$$

onde β é o ângulo do leito com a horizontal, ϕ_n é o ângulo de repouso do material e ψ é o ângulo que o leito forma com o fluxo, sendo 0° correspondente ao fluxo subindo e 180° correspondente ao fluxo descendo, conforme pode ser observado na Figura 18.

FIGURA 18 – DECLIVIDADE DO LEITO E DIREÇÃO DO FLUXO



FONTE: adaptado de Wei et al. (2014)

2.3.3 Arraste e Deposição

O arraste, fenômeno que leva o sedimento em suspensão, e a deposição, fenômeno que faz com que o sedimento suspenso se deposite no leito, são calculados como dois processos opostos que ocorrem simultaneamente, combinados para determinar a taxa de troca entre o sedimento do leito e o sedimento em suspensão.

Para o arraste, a velocidade com que o sedimento deixa o leito do rio é calculada através da equação apresentada por Mastbergen e Van Der Berg (2003):

$$u_{arraste,n} = \alpha_n n_s d_*^{0,3} (\theta_n - \theta'_{cr,n})^{1,5} \sqrt{\frac{\|g\| d_n (\rho_n - \rho)}{\rho_f}} \quad (2-24)$$

onde α_n é o coeficiente de arraste do sedimento de espécie 'n' e \mathbf{n}_s é o vetor normal a superfície do leito fixo.

Para a deposição, a velocidade de queda da partícula é calculada pela equação apresentada por Soulsby (1997):

$$u_{queda,n} = \frac{v}{d_n} \left[(10,36^2 + 1,049d_{*,n}^3)^{0,5} - 10,36 \right] \quad (2-25)$$

sendo $u_{queda,n}$ assumido na mesma direção da aceleração da gravidade:

$$\mathbf{u}_{queda,n} = u_{queda,n} \frac{\mathbf{g}}{\|\mathbf{g}\|} \quad (2-26)$$

Para se levar em conta a interação partícula a partícula, a correlação de Richardson-Zaki é aplicada na velocidade de queda:

$$\mathbf{u}_{queda,n}^* = \mathbf{u}_{queda,n} (1 - c_s)^\zeta \quad (2-27)$$

quando c_s é a fração do volume de sedimentos em suspensão e ζ é o coeficiente de Richardson-Zaki, definido por:

$$\zeta = \zeta_1 \zeta_0 \quad (2-28)$$

em que ζ_1 é o multiplicador do coeficiente de Richardson-Zaki, normalmente igual a 1 e ζ_0 é o coeficiente de Richardson-Zaki definido em função do número de Reynolds de corte, conforme apresentado abaixo:

$$Re^* = \frac{d_n u_{queda,n}}{\nu_f} \quad (2-29)$$

A partir do número de Reynolds de corte, o coeficiente ζ_0 pode ser calculado conforme apresentado na Tabela 1.

TABELA 1 – OBTENÇÃO DO COEFICIENTE ζ_0

$Re^* < 0,2$	$\zeta_0 = 4,35$
$0,2 < Re^* < 1$	$\zeta_0 = 4,35/Re^{*0,03}$
$1 < Re^* < 500$	$\zeta_0 = 4,45/Re^{*0,1}$
$500 < Re^*$	$\zeta_0 = 2,39$

FONTE: Flow Science (2015)

2.3.4 Modelos de Transporte de Sedimentos de Fundo

O transporte de fundo se dá através do rolamento, salteamento e deslizamento das partículas no leito. O software utilizado possui capacidade de calcular o transporte de fundo volumétrico através de três equações empíricas sendo a taxa adimensional de transporte de fundo obtida através das seguintes equações empíricas:

- Meyer-Peter e Muller (1948):

$$\Phi_n = \beta_{MPM,n} (\theta_n - \theta'_{cr,n})^{1,5} c_{b,n} \quad (2-30)$$

- Nielsen (1992):

$$\Phi_n = \beta_{Nie,n} \theta_n^{0,5} (\theta_n - \theta'_{cr,n}) c_{b,n} \quad (2-31)$$

- Van Rijn (1984):

$$\Phi_n = \beta_{VR,n} d_{*,n}^{-0,3} \left(\frac{\theta_n}{\theta'_{cr,n}} - 1 \right)^{2,1} c_{b,n} \quad (2-32)$$

onde $\beta_{MPM,n}$, $\beta_{Nie,n}$, e $\beta_{VR,n}$ são os coeficientes empíricos adotados normalmente igual a 8, 12 e 0,053 respectivamente e $c_{b,n}$ é a fração de material da espécie 'n' no leito.

Meyer-Peter e Muller (1948) apresentou a formulação para cálculo da descarga de fundo por arraste a partir de experiências realizadas entre 1932 e 1948. Os primeiros testes foram realizados utilizando cascalho natural de grãos uniformes com diâmetros de 5,05 mm a 28,6 mm e peso específico de 2680 kg/m³. Segundo Carvalho (2008), a formulação de Meyer-Peter e Muller tem validade para areias e pedregulhos com diâmetros compreendidos entre 0,4 mm a 30 mm.

Segundo Chanson (1999) a formulação proposta por Nielsen em 1992 tem validade para a estimativa do transporte de fundo de materiais com diâmetros compreendidos entre 0,69 e 28,7 mm.

Scapin et al. (2007) apresenta que a formulação proposta por Van Rijn (1984) possui uma estimativa confiável do transporte de fundo de partículas com diâmetros na faixa de 0,2 mm a 2 mm, os quais foram baseados em um estudo de verificação utilizando dados de campo de 580 canais.

A taxa adimensional de transporte de fundo é relacionada ao transporte de fundo volumétrico em cada unidade de tempo por unidade de largura do leito através da equação apresenta abaixo:

$$q_{b,n} = \Phi_n \left[\|g\| \left(\frac{\rho_n - \rho}{\rho_f} \right) d_n^3 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-33)$$

Outra informação importante para o cálculo do transporte de fundo é dada pela espessura do leito em que o sedimento pode saltar (δ_n), calculada através da equação apresentada por Van Rijn (1984):

$$\frac{\delta_n}{d_n} = 0,3 d_{*,n}^{0,7} \left(\frac{\theta_n}{\theta'_{cr,n}} - 1 \right)^{0,5} \quad (2-34)$$

Para se calcular o movimento do sedimento através de cada célula computacional, o valor de $q_{b,n}$ é convertido em velocidade de transporte de fundo pela equação apresentada por Van Rijn (1984):

$$u_{fundo,n} = \frac{q_{b,n}}{\delta_n c_{b,n} f_b} \quad (2-35)$$

onde f_b é a fração crítica de sedimento acondicionado.

2.3.5 Modelo de Transporte de Sedimentos em Suspensão

No leito móvel, somente uma delgada camada superficial de sedimento, com sua espessura definida por algumas vezes o diâmetro do grão, pode se mover através do transporte de fundo. Uma parcela do sedimento entra em suspensão e é transportada dessa forma. Uma vez que, devido a limitações computacionais, não é possível o cálculo da dinâmica dos fluidos em cada partícula de sedimento, são adotados modelo empíricos para cálculo do transporte de sedimentos. O *software* adotado utiliza o modelo proposto por Mastbergen e Van Der Berg (2003) para estimar o transporte de sedimentos em suspensão. A verificação da existência do transporte em suspensão é feita através do critério de Shields, discutido no item 2.3 da presente dissertação.

A concentração em massa de sedimento em suspensão por unidade de volume da mistura é calculada por:

$$\frac{\partial C_{s,n}}{\partial t} + \nabla \cdot (u_{s,n} C_{s,n}) = \nabla \cdot \nabla (D C_{s,n}) \quad (2-36)$$

onde D é o termo difusivo da equação de transporte.

A concentração volumétrica de sedimento é dada por:

$$c_{s,n} = \frac{C_{s,n}}{\rho_n} \quad (2-37)$$

Para a solução da equação (2-36), a velocidade do sedimento $u_{s,n}$ é dada por:

$$u_{s,n} = \bar{u} + u_{queda,n} c_{s,n} \quad (2-38)$$

em que \bar{u} é a velocidade da mistura obtida através da resolução das equações da continuidade e de Navier-Stokes com as equações de fechamento do modelo de turbulência.

2.4 ESTUDOS ANTERIORES

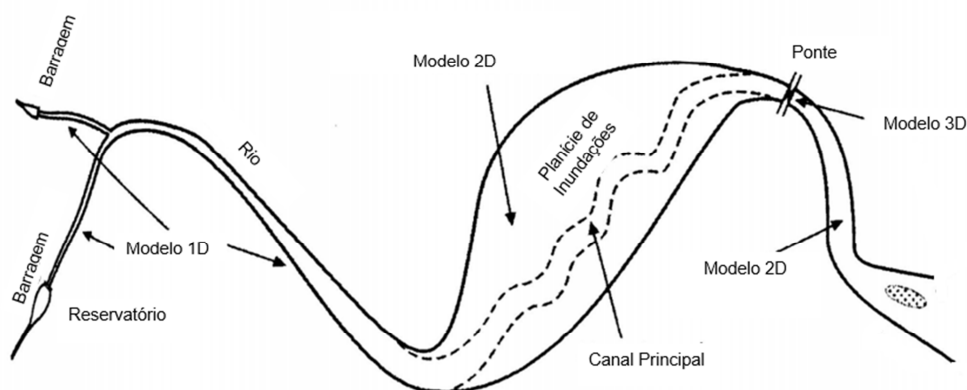
Atualmente, a conceituação e o entendimento dos processos de erosão e deposição de sedimentos estão longe de serem totalmente compreendidos. O transporte de sedimentos é descrito na literatura através de relações empíricas e semi-empíricas, baseadas nas características do sedimento e do escoamento. Pesquisas na área de transporte de sedimentos se intensificaram após Einstein (1950) apresentar a função de transporte de material de fundo (*bed load*). Algumas equações (Du Boys 1879, Meyer-Peter e Muller 1948, Lane e Kalinske 1941, Einstein e Chien 1954, Brooks 1963, entre outras) foram desenvolvidas e calibradas para o transporte de sedimento de fundo, transporte de sedimento em suspensão ou contabilização do transporte total de sedimentos.

Segundo Spasojevic e Holly (2008), a modelagem numérica do transporte de sedimentos, inicialmente com modelos unidimensionais (1D), vem sendo utilizada na prática da engenharia com algum sucesso desde a década de 80. Contudo, o seu uso é limitado quando se trata da resolução com detalhes de problemas localizados, como é o caso de processos de erosão e na proximidade de estruturas hidráulicas, pilares de pontes, etc. Para esses problemas, os modelos bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) podem representar uma melhor ferramenta para o

desenvolvimento do estudo, mediante o uso de softwares mais complexos e um aumento do custo computacional.

Segundo Spasojevic e Holly (2008), desde 2006, com o desenvolvimento da capacidade computacional para resolução de problemas numéricos, esses modelos são mais comumente encontrados. Especialmente os modelos 3D, tem seu uso limitado a resolução de problemas localizados e em um curto período de tempo, em complemento aos modelos 1D e 2D, utilizados na resolução de processos ao longo de um longo período de tempo e espacialmente maiores, como é o caso dos estudos de deposição e limpeza de sedimentos em um reservatório. Segundo Wu (2008), ainda existem problemas que requerem a utilização conjunta de modelos 1D, 2D e 3D, como é o caso do exemplo apresentado na Figura 19. Segundo Wu (2008), no trecho de montante, com barragens, poderá ser utilizado um modelo 1D, simplificando assim as condições de contorno do problema. Já nas regiões onde são apresentadas planícies de inundação, um modelo 2D com a simplificação de profundidade média poderá ser utilizado para o cálculo. Já na região de estruturas, como é o caso de uma ponte, um modelo 3D deverá ser utilizado para a simulação.

FIGURA 19 – RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS COM MODELAGEM 1D, 2D E 3D



Fonte: Adaptado de Wu (2008)

Conforme apresentado por Spasojevic e Holly (2008), para resolução de problemas envolvendo o arraste e deposição de sedimentos no leito do rio ao redor de estruturas hidráulicas, é requerida a utilização de um modelo 3D, uma vez que o fluxo nessas regiões pode ser caracterizado por altas acelerações verticais (o que não é reconhecido com a hipótese de distribuição hidrostática de pressões) com

tratamento distinto entre o arraste de fundo e a parte de sedimento em suspensão. Normalmente, para esse tipo de problema a consideração de fluxo não-permanente (*unsteady-flow*) não é necessária, e, excepcionalmente em circunstâncias especiais onde o sedimento do rio é uniforme e homogêneo, pode ser necessária a modelagem de múltiplos tipos de sedimentos.

Os modelos 3D com transporte de sedimentos resolvem as equações da continuidade e as equações de Navier-Stokes nas três direções juntamente com as equações de conservação de massa de sedimentos através da aplicação de métodos numéricos como o método das diferenças finitas, dos elementos finitos ou dos volumes finitos. Uma especial importância é dada a escolha do modelo de turbulência utilizado nessas simulações, uma vez que a resolução das equações de difusão da quantidade de movimento e do transporte de sedimentos ao longo de regiões com distribuição de velocidades não-uniformes é a essência da resolução do problema.

Além de problemas envolvendo a resolução dos processos de erosão e deposição, muitas análises de qualidade da água, como por exemplo, de turbidez causada pela alta concentração de sedimentos em suspensão, fazem utilização de modelos numéricos com transporte de sedimentos. As análises de qualidade de água não serão abordadas nesta pesquisa.

Vários autores vêm estudando a resolução de problemas numéricos envolvendo transporte de sedimentos ao redor de estruturas hidráulicas.

Acharya (2011) realizou um estudo para validação de análises numéricas para simulação do escoamento e transporte de sedimentos em torno de uma série de diques, utilizando para as análises numéricas o software FLOW 3D®. Acharya (2011) conclui que para simulações de fluxos turbulentos a utilização do modelo de fechamento turbulento *Renormalized Group Model* ($k - \varepsilon$ RNG) é mais eficiente.

Xie (2011) estudou o transporte de sedimentos em escoamentos pressurizados abaixo de tabuleiros de pontes, utilizando os softwares FLOW 3D® e STARCCM+. A respeito do software FLOW 3D®, Xie (2011) conclui sobre a importância das dimensões da malha nas regiões próximas à interface do leito móvel e do fluido, sendo indicado que o tamanho dos elementos verticais da malha não exceda o diâmetro das partículas de sedimento.

Tulimilli et al. (2011) apresentou um estudo similar ao de Xie (2011), com a aplicação de modelos numéricos em escoamentos pressurizados abaixo de tabuleiros de pontes, utilizando o software STARCCM+, onde conclui que o procedimento de cálculo apresenta resultados satisfatórios no estudo das erosões nessas regiões. Nessas simulações foi utilizado o modelo turbulência $k - \varepsilon$.

Afzal (2013) estudou a resolução de problemas numéricos de fluxos turbulentos com transporte de sedimentos na região de pilares sob ação de correntes e ondas utilizando o software REEF3D[®]. O estudo conclui que o modelo fornece resultados satisfatórios no que diz respeito a evolução geral das erosões (geometria, localização e profundidade) nessas regiões mediante a comparação com resultados obtidos em modelos físicos. Uma análise comparativa entre os modelos de turbulência $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ foi realizada, chegando-se à conclusão que o modelo de turbulência $k - \omega$ conduziu a melhores resultados.

Mehnifard et al. (2014) estudou a validade do FLOW 3D[®] para a simulação de erosões causadas por jatos horizontais submersos, mediante confronto dos resultados do modelo numérico com os resultados de modelo físicos. Nas conclusões desse estudo é apresentado que o modelo de turbulência *Renormalized Group Model* ($k - \varepsilon$ RNG) conduziu a melhores resultados e a comparação dos resultados com os obtidos no modelo físico indicaram uma diferença média de 11% na profundidade de erosão.

Chauvin et al. (2014) utilizou o modelo numérico FLOW 3D[®] para estudar a evolução da erosão e deposição causada por jatos turbulentos em uma fossa de erosão a jusante de uma estrutura hidráulica. Os estudos foram pautados em dados de ensaios realizados previamente em modelo físico, com sedimentos não-coesivos. Segundo Chauvin et al. (2014), os resultados obtidos no modelo numérico se tiveram boa aproximação dos resultados obtidos no modelo físico em termos de profundidade de erosão e altura de deposição de sedimentos, sendo obtido um coeficiente de determinação de 0,90 entre os valores.

Ahmad et al. (2015) avaliou a erosão em pilares em regiões costeiras sujeitas a ondas através do software REEF3D[®]. Nesse modelo numérico o transporte de sedimentos de fundo e em suspensão é avaliado através da resolução das equações propostas por Van Rijn (1984). Nesse estudo foram realizadas comparações nas erosões observadas em pilares circulares e em pilares

triangulares posicionados lado a lado. Ahmad et al. (2015) conclui que, comparativamente aos pilares circulares, o arranjo com pilares triangulares resultou em menor profundidade de erosão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O método adotado consiste em simular o escoamento tridimensional do vertedouro da AHE São Salvador através de todos os seus componentes. Serão feitas análises dos padrões de erosão a jusante da bacia de dissipação de maneira qualitativa e quantitativa (através das profundidades de erosão, das alturas de deposição e da localização das mesmas), através da comparação dos resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas no FLOW 3D® com os resultados do modelo físico (CEHPAR, 2002), avaliando-se assim o nível de precisão com que o programa numérico adotado é capaz de reproduzir os resultados do modelo físico.

Ainda, serão feitas análises de sensibilidades do ângulo de atrito do material adotado na simulação, das condições de contorno laterais impostas nas simulações e do modelo de turbulência adotado para a resolução do problema.

3.1 ESTUDO DE CASO – AHE SÃO SALVADOR

A AHE São Salvador é um empreendimento construído no Brasil, mais especificamente no Estado do Tocantins e no rio que recebe o nome do estado, rio Tocantins. O início da construção do empreendimento se deu ano de 2002, sendo o término no início do ano de 2009. Na Figura 20 é apresentada a AHE São Salvador já em operação.

FIGURA 20 – AHE SÃO SALVADOR



FONTE: www.tractebelenergia.com.br, acessado em 20/09/2016.

A usina possui potência instalada de 243 MW, sendo a área de drenagem no eixo do barramento de 61.298 km² e vazão média de 971 m³/s. Os estudos hidrológicos conduziram a vazão de pico da cheia máxima provável (CMP) de

19.300 m³/s. O desvio do rio para construção da barragem de concreto compactado com rolo foi realizado através de vãos rebaixados do vertedouro. O vertedouro por sua vez foi projetado para descarregar a cheia máxima provável (CMP) com uma pequena sobrelevação no reservatório. Na passagem de cheias mais recorrentes, a vazão é controlada por seis (6) comportas segmentos de 15,4 m de largura por 23 m de altura, e o fluxo é restituído ao rio por meio de uma bacia de dissipação posicionada logo a jusante do vertedouro. O reservatório é operado a fio d'água, ou seja, sem regularização de vazões. Os níveis de água operacionais definidos no projeto são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 – NÍVEIS OPERACIONAIS DA AHE SÃO SALVADOR

Níveis Operacionais	Montante (m)	Jusante (m)
Nível Máximo Normal	287,00	263,60
Nível Máximo Excepcional	287,30	276,30
Nível Mínimo Normal	-	263,10

FONTE: adaptado de CEHPAR (2002)

Na ocasião dos estudos de investigação da AHE São Salvador a avaliação do escoamento e sua ação erosiva a jusante das estruturas foi realizada somente no modelo físico no laboratório do Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2002).

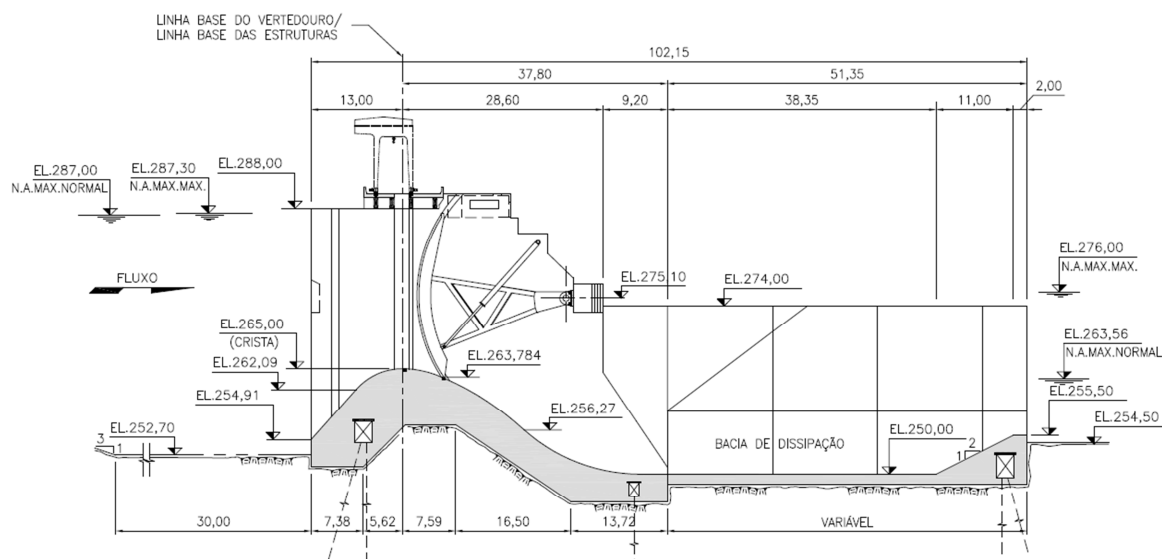
3.2 MODELAGEM FÍSICA

Foram realizados testes em modelo físico reduzido construído de acordo com o critério de semelhança de Froude para verificação do vertedouro da AHE São Salvador em modelo parcial (ou seja, verificação isolada da operação do vertedouro) construído na escala geométrica 1:60.

Os ensaios foram realizados no mediante a construção de um trecho do vertedouro com largura correspondente a dois vãos (64,7 cm no modelo), sendo o trecho inicial do canal posicionado na elevação 258,00 m. A jusante da bacia de dissipação do vertedouro foi configurado um canal com a mesma largura do canal de aproximação e elevação variando entre 254,50 m e 256,50 m. A Figura 21 apresenta

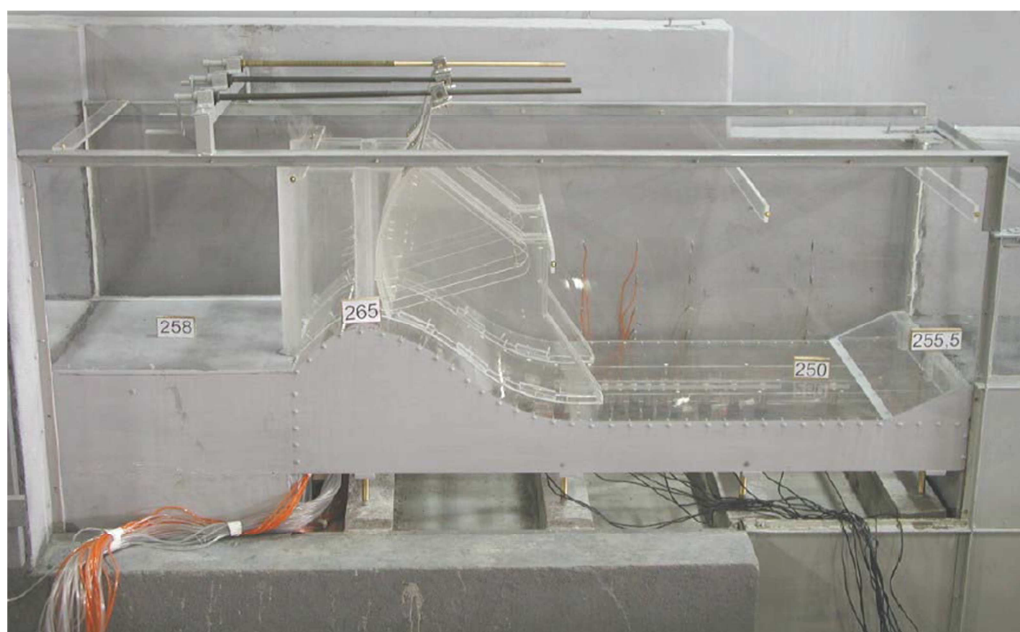
o projeto do vertedouro da AHE São Salvador. A Figura 22 apresenta a estrutura implantada no respectivo modelo físico.

FIGURA 21 – ESTRUTURA DO VERTEDOURO DA AHE SÃO SALVADOR – PROJETO



FONTE: CEHPAR (2002)

FIGURA 22 – ESTRUTURA DO VERTEDOURO DA AHE SÃO SALVADOR – MODELO FÍSICO

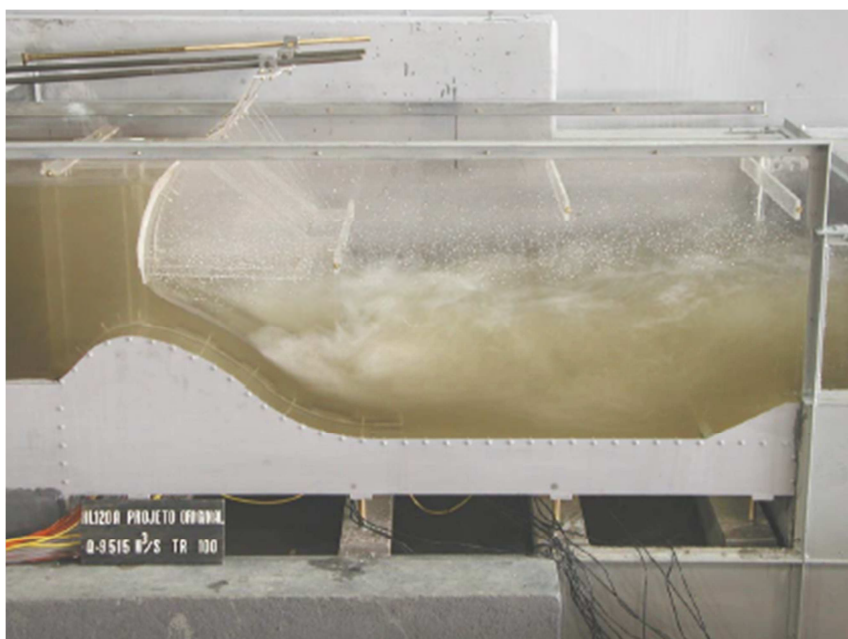


FONTE: CEHPAR (2002)

Nos ensaios realizados foram obtidos registros das condições de fluxos, tais como níveis de água a montante e a jusante do vertedouro, pressões instantâneas e

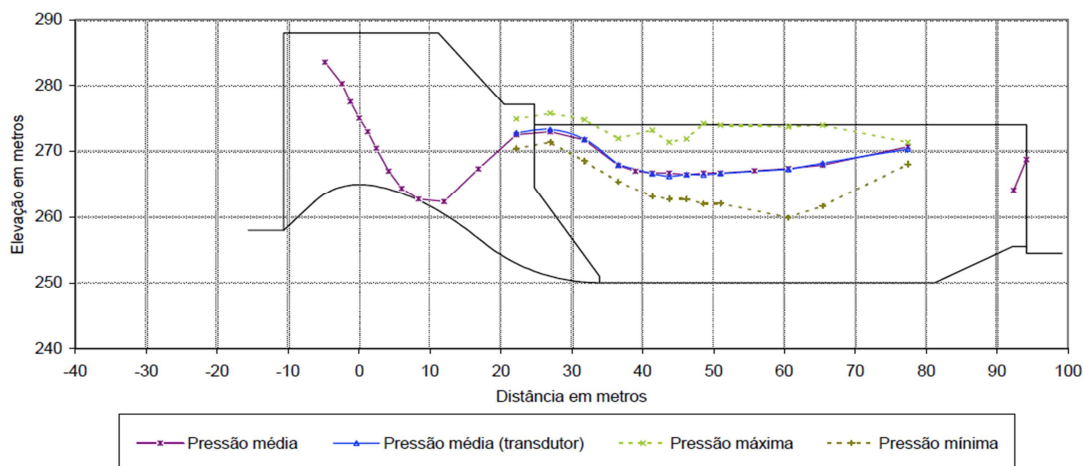
médias ao longo da crista e da bacia de dissipação, perfil da linha de água ao longo do vertedouro e velocidades máximas a jusante da bacia de dissipação, além de observações gerais das condições de escoamento na bacia de dissipação. A Figura 23 apresenta as condições de fluxo durante o ensaio com a vazão de 113,7 L/s no modelo físico. Essa vazão equivale a vazão de 9515 m³/s em protótipo, quando operada todos os vãos do vertedouro. A Figura 24 apresenta os registros de pressão ao longo da estrutura para esta condição de fluxo.

FIGURA 23 – ENSAIO COM A VAZÃO DE 113,7 L/S (9515 M³/S EM PROTÓTIPO)



FONTE: CEHPAR (2002)

FIGURA 24 – PRESSÕES MEDIDAS NO ENSAIO COM A VAZÃO DE 113,7 L/S (9515 M³/S EM PROTÓTIPO)



FONTE: CEHPAR (2002)

Além das verificações hidrodinâmicas, foi realizada uma série de ensaios para estimativa das erosões a jusante da bacia de dissipação do vertedouro da AHE São Salvador a partir da implantação de fundo móvel nessa região. Nos estudos realizados em modelo físico, o fundo móvel foi representado por material granular. Em uma primeira sequência de ensaios foi utilizado material com diâmetro médio correspondente a 95,4 cm em protótipo (15,9 mm em modelo). Na segunda sequência de ensaios foi utilizado material com 47,6 cm em protótipo (7,93 mm em modelo). A Tabela 3 apresenta os diâmetros médios, máximos e mínimos dos materiais utilizados nos ensaios. A Figura 25 apresenta a configuração inicial da região com fundo móvel no modelo físico.

TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE FUNDO MÓVEL

Tipo do Sedimento	Diâmetro Mínimo do Sedimento		Diâmetro Médio do Sedimento		Diâmetro Máximo do Sedimento	
	Protótipo (m)	Modelo (mm)	Protótipo (m)	Modelo (mm)	Protótipo (m)	Modelo (mm)
1	0,762	12,7	0,954	15,9	1,146	19,1
2	0,381	6,4	0,476	7,9	0,571	9,5

FONTE: adaptado de CEHPAR (2002)

FIGURA 25 – CONFIGURAÇÃO INICIAL DO FUNDO MÓVEL A JUSANTE DA BACIA DE DISSIPAÇÃO DO VERTEDOURO



FONTE: CEHPAR (2002)

Cada teste foi realizado com duração de 50 minutos no modelo, o que corresponde a 6,5 horas no protótipo. Após cada teste foi registrado o perfil de erosão a jusante da bacia de dissipação ao longo do eixo longitudinal do modelo. Foram testadas duas configurações: a primeira identificada no relatório do modelo como “configuração original”, e a segunda identificada como “alternativa 1”. Na “alternativa 1”, além dos ensaios para as vazões de 5225 m³/s e 9515 m³/s, foi realizado um ensaio com vazão progressiva, sendo cada etapa do ensaio com duração de 50 minutos. A etapa subsequente teve como configuração inicial de fundo móvel a configuração final da etapa anterior. A Tabela 4 apresenta informações dos ensaios realizados no modelo físico.

TABELA 4 – ENSAIOS REALIZADOS COM FUNDO MÓVEL NO MODELO FÍSICO

Configuração	Número do Ensaio	Vazões Ensaçadas (m ³ /s)	Diâmetro Médio do Fundo Móvel (mm)
Original	1	5225	15,9
	2	9515	15,9
Alternativa 1	3	5225	15,9
	4	9515	15,9
	5	5225	7,9
		8240	7,9
		9515	7,9
		13730	7,9
		19300	7,9

FONTE: adaptado de CEHPAR (2002)

Na presente dissertação os estudos são pautados com base nos resultados do ensaio 2, com uma vazão equivalente em protótipo a 9515 m³/s. Essa decisão foi tomada por ser o ensaio 2 o que apresentou uma maior erosão na região a jusante da bacia de dissipação do vertedouro para a configuração original. Os ensaios 3 e 4 da configuração “alternativa 1” apresentaram resultados em termos de erosão muito semelhantes aos ensaios 1 e 2 respectivamente. Já o ensaio 5, embora seja o ensaio que apresentou as maiores erosões na região a jusante da bacia de dissipação por se tratar de um ensaio com material mais fino e maiores vazões seria de difícil reprodução no modelo matemático, uma vez que a configuração final do fundo móvel para cada etapa do ensaio deveria ser adotada como condição inicial da etapa subsequente. Essa dificuldade se daria devido às condições

hidrodinâmicas do modelo matemático, uma vez que para se atingir uma condição hidrodinâmica estável para cada abertura das comportas e para cada nível de jusante deve ser feita uma simulação com a consideração de fundo fixo previamente. A Figura 26 apresenta a configuração do fundo móvel a jusante da bacia de dissipação do vertedouro para o ensaio 2 durante a sua realização – o escoamento se dá da esquerda para a direita.

FIGURA 26 – ENSAIO COM FUNDO MÓVEL A JUSANTE DA BACIA DE DISSIPÇÃO DO VERTEDOURO - VAZÃO DE 113,7 L/S (9515 M³/S EM PROTÓTIPO)



FONTE: CEHPAR (2002)

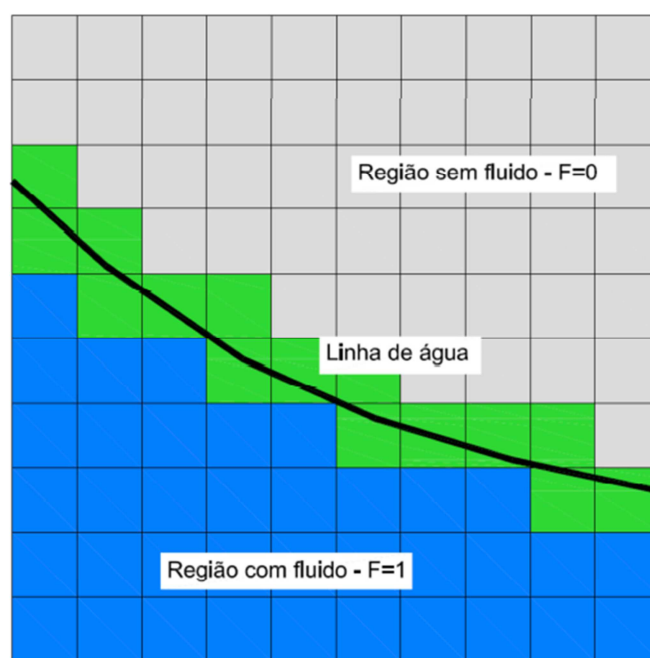
3.3 MODELAGEM NUMÉRICA

Para resolver numericamente o problema utilizou-se o modelo numérico computacional FLOW 3D[®].

Este programa é baseado no método dos volumes finitos para resolução das equações de Navier-Stokes, que constituem um modelo teórico representativo da dinâmica dos fluidos newtonianos. A rotina do programa FLOW 3D[®] permite modelar

fluxos tridimensionais de grande complexidade através do método “FAVOR” - *Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method*. Este método estabelece critérios para definir a geometria com base na parcela das células ocupadas pelo sólido. Segundo apresentado por Dalmora (2016), o FLOW 3D® utiliza o método do “*Volume of Fluid (VOF)*” que é aplicado com o propósito de discretizar a superfície livre do escoamento. Isso significa que o programa exclui do cálculo as células que não contribuem para o fluxo através da definição de uma função “F”, com valor atribuído a cada célula. Segundo apresentado por Araújo Filho (2014), a unidade ($F = 1$) é atribuída a células totalmente preenchidas, e a nulidade ($F = 0$) atribuído a células vazias, sendo valores intermediários atribuídos a células parcialmente preenchidas de acordo com a fração ocupada por fluídos. Essas células com valores intermediários representam a superfície livre do escoamento. Esse conceito traz a vantagem de diminuir o tempo de simulação. A Figura 27 exemplifica o exposto.

FIGURA 27 – EXEMPLO DE MALHA COMPUTACIONAL NO MÉTODO “VOF – VOLUME OF FLUID”



Fonte: Araújo Filho (2014)

Outro aspecto presente no modelo numérico adotado é a capacidade deste em modelar escoamentos turbulentos através de seis modelos de turbulência: *Prandtl Mixing-Length Model*, *One-Equation*, *Two-Equation* [$(k - \varepsilon)$, $(k - \omega)$], *Renormalized Group Model (RNG $k - \varepsilon$)* e *Large Eddy Simulation Model (LES)*.

Nas versões mais recentes do *software* foi introduzido um módulo para cálculo do transporte de sedimentos (erosão e deposição), simulando tanto o arraste através das regiões de fundo móvel quanto a deposição das partículas devido à ação da gravidade. Segundo Brethour e Burnham (2010), quando combinado com a dinâmica dos fluidos nas três direções do escoamento o modelo é capaz de simular a deposição e arraste de areia, silte e outros sedimentos não coesivos. Os modelos utilizados no programa apresentam limitações quanto à consideração de sedimentos coesivos.

Conforme apresentado por Brethour e Burnham (2010), o modelo de transporte de sedimentos utilizado apresenta as seguintes ferramentas:

- Simulação da fase suspensa, que permite a simulação de deposição de sedimentos;
- Simulação com até 10 tipos de sedimento, permitindo a distinção da litologia tal qual a encontrada na região do aproveitamento;
- Simulação do transporte de fundo (bed-load) através de três modelos, para simulação do rolamento que ocorre de uma partícula de sedimento sobre a outra, salto e arraste.

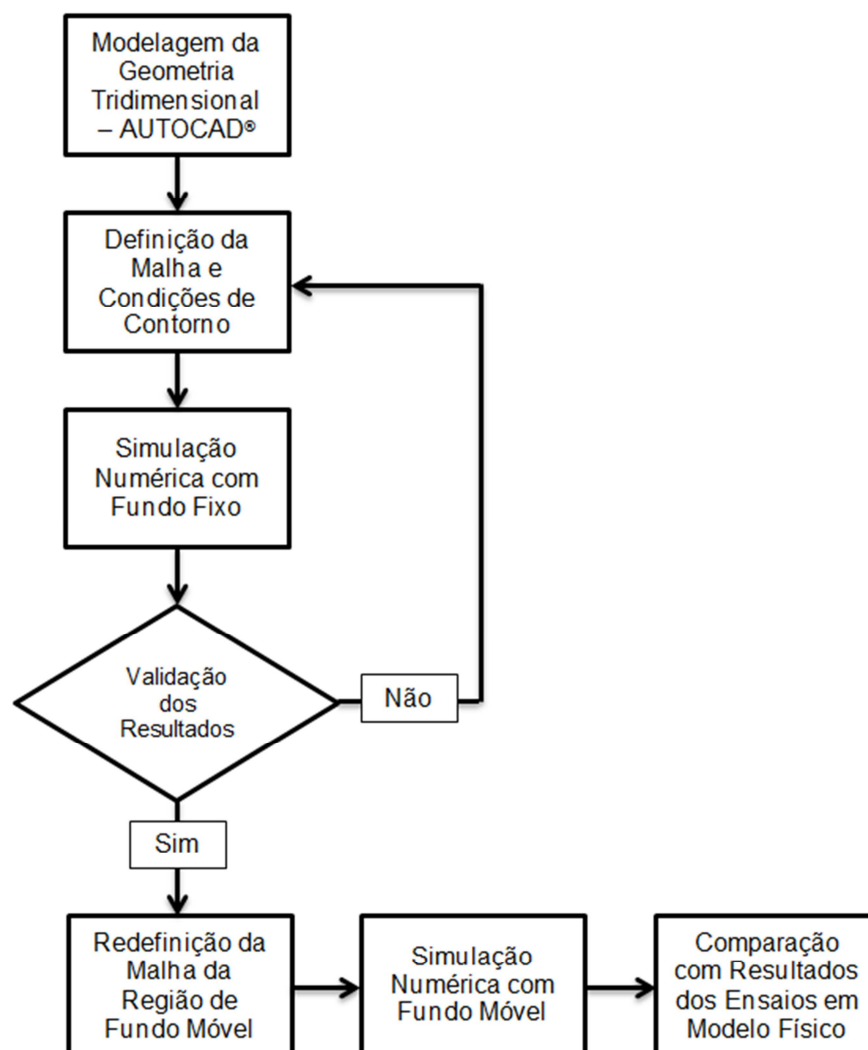
Em cada ponto da malha computacional é calculada a fase suspensa e o arraste de fundo de forma independente, sendo o transporte total dado pela soma das duas fases. Para o cálculo do transporte de fundo o *software* apresenta três equações conforme apresentado no item 2.3.4: Meyer-Peter Muller (MPM), Van Rijn (VR) e Nielsen (NI). No presente trabalho serão utilizadas as formulações de Meyer-Peter Muller e Nielsen.

Devido à natureza do material móvel utilizado no modelo físico da AHE São Salvador e das velocidades do fluxo observando no modelo físico, não se espera que haja transporte do sedimento na fase suspensa, sendo para esse trabalho a modelagem do transporte de fundo de maior importância.

Com o objetivo de se obter uma condição de fluxo ao longo do vertedouro e bacia de dissipação compatível as condições registradas no modelo hidráulico reduzido (níveis de água e pressão média), foi realizada uma primeira simulação com a consideração de fundo fixo em todo o domínio do modelo numérico, sendo então as condições de contorno iniciais para as simulações com fundo móvel fiéis as observadas no modelo físico. A partir dessa condição de fluxo, iniciaram-se as

simulações com material móvel na região de jusante do vertedouro. A Figura 28 demonstra a sequência aplicada.

FIGURA 28 – FLUXOGRAMA DA SEQUÊNCIA DE SIMULAÇÕES REALIZADAS



FONTE: O autor (2017)

Com base nos resultados dos estudos em modelo físico realizados pelo CEHPAR, realizaram-se três simulações com fundo móvel em modelo numérico, utilizando dois modelos de transporte de sedimento diferentes, para comparação dos resultados, reproduzindo todo o tempo de duração do ensaio realizado em modelo físico – 50 minutos. Adicionalmente se realizou uma simulação com um dos modelos de transporte de sedimentos para com o parâmetro $\beta_{MPM,n}$ diferente. Em todas as simulações realizadas nessa etapa se utilizou o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG. As simulações realizadas são apresentadas na Tabela 5.

TABELA 5 – SIMULAÇÕES REALIZADAS NO MODELO NUMÉRICO – 50 MINUTOS

Ensaio no Modelo Físico	Vazão		Diâmetro Médio do Fundo Móvel		Ângulo de Atrito do Material	Equação de Transporte de Fundo	Coeficiente de Transporte de Fundo β_n
	Protótipo (6 Vãos) (m³/s)	Modelo (2 Vãos) (L/s)	Protótipo (m)	Modelo (mm)			
2	9515	114	0,954	15,9	32	MPM	8
2	9515	114	0,954	15,9	32	MPM	13
2	9515	114	0,954	15,9	32	NI	12

MPM = Meyer-Peter Muller

NI = Nielsen

FONTE: O autor (2017)

Adicionalmente as simulações apresentadas Tabela 5, foram realizadas simulações para uma análise de sensibilidade do ângulo de atrito do material móvel utilizado, das condições de contorno nas laterais do modelo, do modelo de turbulência utilizado na resolução do problema e do diâmetro médio do material adotado na região de fundo móvel. Todas as simulações dessa etapa foram realizadas com a adoção do modelo de transporte de sedimentos de Meyer-Peter Muller (MPM) e duração de 10 minutos. Os parâmetros adotados em cada simulação são apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 – SIMULAÇÕES REALIZADAS NO MODELO NUMÉRICO – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – 10 MINUTOS

Simulação	Vazão		Diâmetro Médio do Fundo Móvel		Ângulo de Atrito do Material	Equação de Transporte de Fundo	Modelo de Turbulência Utilizado	Condição de Contorno Lateral
	Protótipo (6 Vãos) (m³/s)	Modelo (2 Vãos) (L/s)	Protótipo (m)	Modelo (mm)				
4	9515	114	0,954	15,9	32	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Simetria
5	9515	114	0,954	15,9	20	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Parede
6	9515	114	0,954	15,9	20	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Simetria
7	9515	114	0,954	15,9	32	MPM	$k - \omega$	Parede
8	9515	114	0,954	15,9	32	MPM	$k - \omega$	Simetria
9	9515	114	0,09	1,5	32	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Parede
10	9515	114	0,09	1,5	32	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Simetria
11	9515	114	0,48	8,0	32	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Parede
12	9515	114	0,48	8,0	32	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Simetria

MPM = Meyer-Peter Muller

FONTE: O autor (2017)

Os principais dados de entrada do modelo numérico são a geometria da estrutura hidráulica, a malha de volumes finitos para a simulação numérica, as

condições de contorno do modelo numérico, as condições iniciais do fluido e a ativação dos modelos para simular os fenômenos físicos envolvidos: turbulência e transporte de sedimentos.

3.3.1 Geometria da Estrutura Hidráulica

As várias partes que compõe o modelo (canal de aproximação, estrutura do vertedouro, canal de restituição, comportas radiais) foram definidas com base nos materiais que as compõe, permitindo assim que a rugosidade do material fosse tratada de forma diferente em cada componente do modelo.

Buscou-se através da geometria implantada a representação do vertedouro da mesma forma que foi realizada no modelo físico, simulando somente a largura equivalente a dois vãos do vertedouro. Uma vez que o principal objetivo do presente trabalho é comparar os resultados obtidos na simulação numérica com os resultados obtidos no modelo físico, para se eliminar incertezas decorrentes do efeito de escala, se manteve na modelagem numérica a mesma escala geométrica utilizada na modelagem física, ou seja, 1:60. A rugosidade do modelo numérico também foi baseada na geometria simulada no modelo físico, ou seja, a rugosidade dos canais de aproximação e restituição, os quais são escavados em rocha no protótipo, buscam representar uma superfície mais lisa, uma vez que no modelo físico esses canais foram revestidos com argamassa, o qual possui uma rugosidade consideravelmente menor.

Já nas simulações com fundo móvel, a rugosidade foi definida como sendo dependente do diâmetro médio do material móvel. Conforme indicado por Flow Science (2015), a rugosidade da região configurada em fundo móvel foi definida como 2,5 vezes o diâmetro médio do material.

3.3.2 Malha de Volumes Finitos para Simulação Numérica

Na criação de um modelo numérico, a definição da malha é uma das etapas mais importantes, uma vez que a discretização da malha definirá a precisão com que a superfície da estrutura será representada. Esse processo é muitas vezes iterativo, sendo que uma malha ótima é aquela capaz de reproduzir da melhor maneira a geometria com o menor número de elementos. Isso pode ser verificado através de comparações sucessivas dos resultados obtidos entre malhas com elementos

maiores e malhas mais refinadas: uma vez que o refinamento da malha não interfira nos resultados obtidos, pode-se dizer que para a geometria em estudo a malha é ótima.

Foi utilizada uma malha estruturada triortogonal definida a partir de coordenadas cartesianas devido à natureza da geometria. Embora a malha seja ortogonal, as dimensões dos seus elementos podem ser diferentes em cada direção. Contudo, é indicado no manual do software adotado (Flow Science, 2015) que a relação entre as dimensões em cada direção não exceda o valor de 3, sendo que quanto mais próxima da unidade for essa razão mais uniforme e mais facilmente resolvida será a simulação. O FLOW 3D[®] também admite que a malha seja feita através de múltiplos blocos, ou seja, que sejam determinadas áreas com refinamento diferenciado, tantas quantas forem necessárias. Conforme apresentado por Dalmora (2016), para garantir a correta compreensão da discretização das malhas, o FLOW 3D[®] exige que os blocos ortogonais da malha mais refinada tenham arestas coincidentes com os elementos da malha menos refinada.

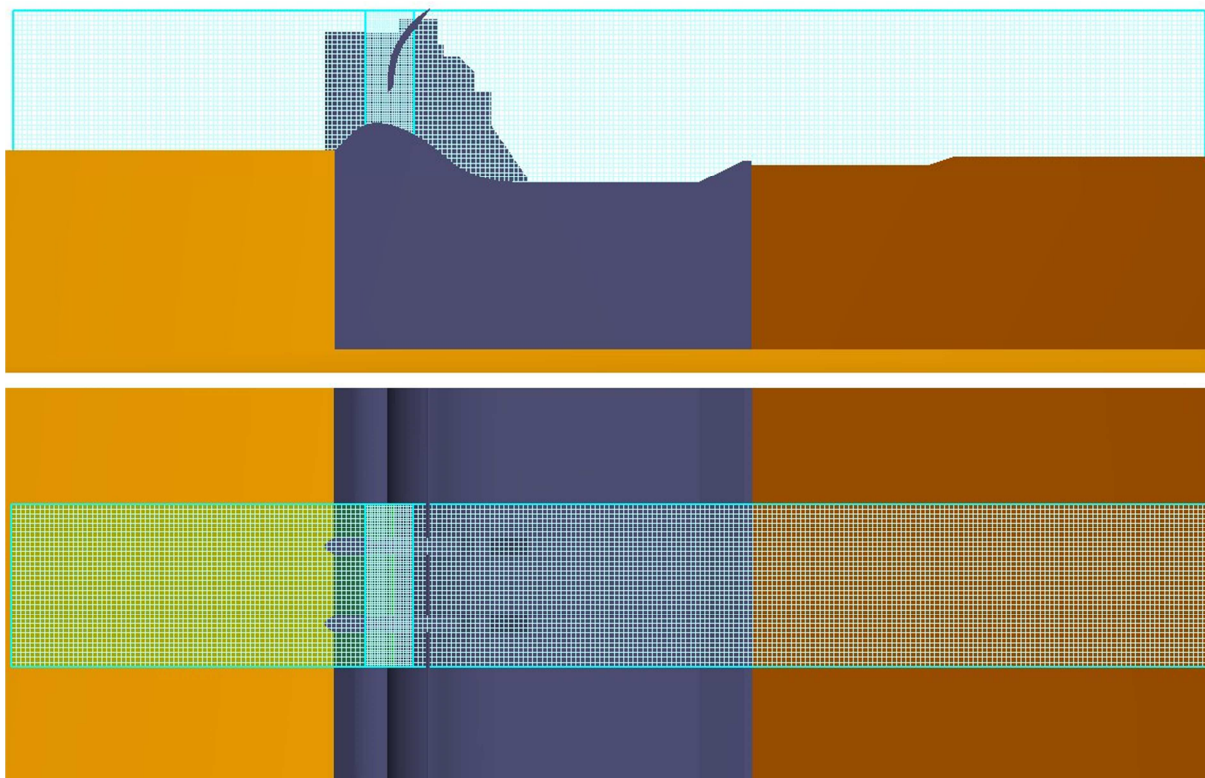
No desenvolvimento do estudo foram utilizadas malhas distintas nas simulações com fundo fixo e nas simulações com fundo móvel. Nas simulações com fundo fixo as malhas utilizadas possuem as características apresentadas na Tabela 7. Pode-se notar que na região das comportas do vertedouro foi necessária a adoção de uma malha mais refinada, com elementos menores, buscando-se representar fielmente a geometria da comporta e o controle que a mesma exerce sobre o escoamento. A Figura 29 apresenta as malhas utilizadas nas simulações com fundo fixo.

TABELA 7 – CARACTERÍSTICAS DA MALHA NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO FIXO

Bloco	Direção	Mínimo (m)	Máximo (m)	Comprimento Total na Direção (m)	Número de Elementos	Dimensão da Malha na Direção (m)	Número de Elementos da Malha
1	X	2,0000	7,0000	5,00	250	0,02000	476000
	Y	0,9834	1,6634	0,68	34	0,02000	
	Z	1,3000	2,4200	1,12	56	0,02000	
2	X	3,4800	3,6800	0,20	20	0,01000	84320
	Y	0,9834	1,6634	0,68	68	0,01000	
	Z	1,8000	2,4200	0,62	62	0,01000	

FONTE: O autor (2017)

FIGURA 29 – MALHA UTILIZADA NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO FIXO



FONTE: O autor (2017)

Já nas simulações com fundo móvel, devido às dimensões do material granular, foi necessário aumentar o tamanho dos elementos da malha nessa região, sendo as características dos blocos de malha utilizados apresentadas na Tabela 8. Nota-se que na região de fundo móvel a malha possui elementos com o dobro das dimensões da malha na região de fundo fixo. No manual do Flow 3D® (Flow Science, 2015) é indicado que a relação entre o diâmetro do material solto e as dimensões dos elementos da malha seja da ordem de 10%. Entretanto, para que fosse possível se respeitar essa relação no presente estudo a malha deveria ser formada por elementos de 0,16 m, o que prejudicaria a adequada resolução hidrodinâmica do problema, sendo a geometria dos elementos que compõem a estrutura discretizadas de forma grosseira e as relações descritas pelo manual do Flow 3D® (Flow Science, 2015) para blocos de malhas sucessivos (de no máximo 3 em cada direção) não respeitadas. Portanto, se admitiu na resolução do presente problema que a relação entre o diâmetro do material e da dimensão dos elementos da malha fosse da ordem de 40%, sendo assim a relação entre as dimensões em cada direção dos elementos

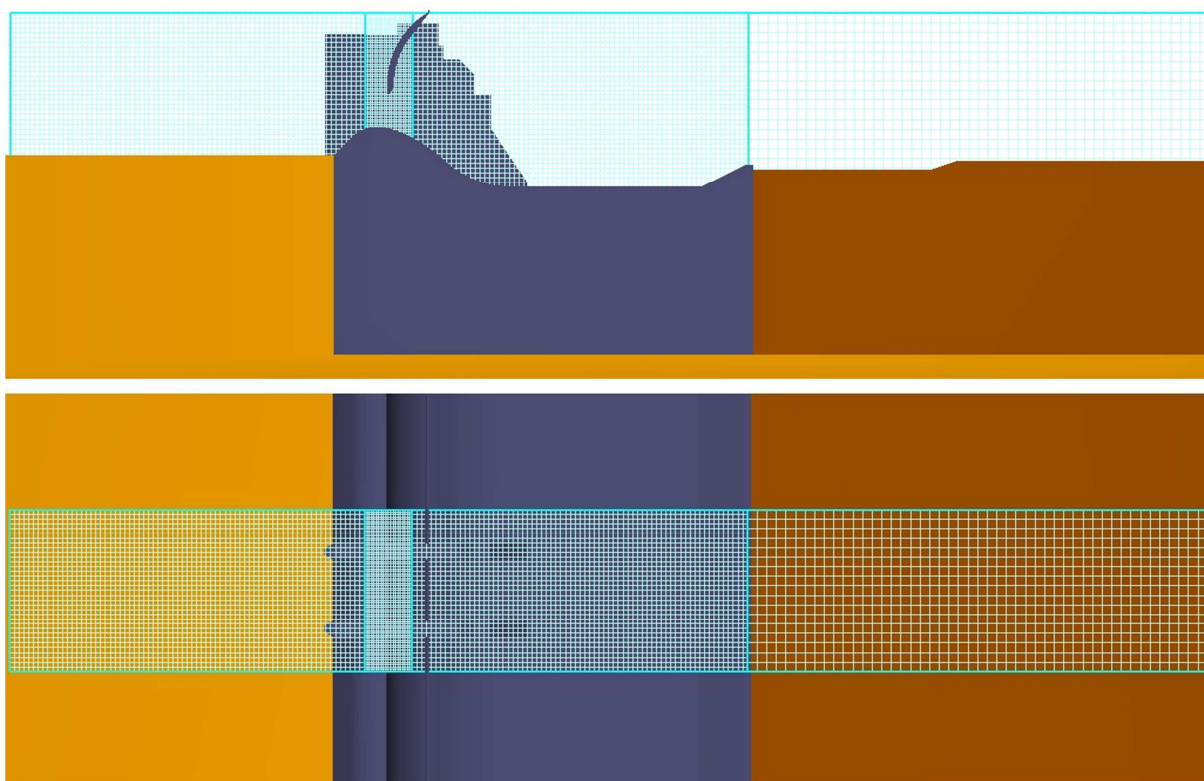
da malha dos blocos sucessivos de 2. A Figura 30 apresenta as malhas utilizadas nas simulações com fundo móvel.

TABELA 8 – CARACTERÍSTICAS DA MALHA NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO MÓVEL

Bloco	Direção	Mínimo	Máximo	Comprimento na Direção (m)	Número de Elementos	Dimensão da Malha na Direção (m)	Número de Elementos da Malha
1	X	2,0000	5,0800	3,08	154	0,02000	293216
	Y	0,9834	1,6634	0,68	34	0,02000	
	Z	1,3000	2,4200	1,12	56	0,02000	
2	X	3,4800	3,6800	0,2	20	0,01000	84320
	Y	0,9834	1,6634	0,68	68	0,01000	
	Z	1,8000	2,4200	0,62	62	0,01000	
3	X	5,0800	7,0000	1,92	170	0,04000	122400
	Y	0,9834	1,6634	0,68	18	0,04000	
	Z	1,3000	2,4200	1,12	40	0,04000	

FONTE: O autor (2017)

FIGURA 30 – MALHA UTILIZADA NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO MÓVEL



FONTE: O autor (2017)

3.3.3 Condições de Contorno

As condições de contorno foram definidas nas faces dos blocos da malha, ou seja, é necessária a definição de seis condições de contorno em cada bloco. Segundo Dalmora (2016), as condições de contorno dependem dos resultados esperados e das informações disponíveis para a simulação. No estudo desenvolvido foram utilizadas condições de contorno do tipo pressão, simetria e parede.

Existem, tipicamente, dois tipos de condições de contorno do tipo pressão: estática ou de estagnação. Para a condição de pressão de estagnação, assume-se que o fluido entra no domínio da simulação com velocidade zero. Para a condição de pressão estática, a pressão é aproximadamente contínua ao longo do contorno e a velocidade no contorno é computada a partir da vazão e a respectiva área de escoamento. Na condição de contorno do tipo simetria, a face assume uma condição de “*free-slip*” e não existem velocidades normais à fronteira, conseqüente não existe escoamento através da fronteira. A condição de contorno do tipo parede permite definir a não existência de escoamento em uma determinada fronteira, ou seja, não existem velocidades normais à mesma. Contudo, ainda é possível que existam velocidades tangenciais e, conseqüentemente, tensões tangenciais.

Em função dos dados disponíveis para o presente estudo, foram definidos os tipos de condições de contorno conforme apresentado na Tabela 9 e na Figura 31 e Figura 32. Adicionalmente, nas simulações realizadas para a análise de sensibilidade se variou a condição de contorno lateral do modelo, sendo adotada uma condição do tipo simetria para comparação com as demais simulações realizadas. Na Tabela 10 são apresentados os níveis de água impostos em cada simulação.

TABELA 9 – TIPO DE CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES

Tipo de Simulação	Bloco	Direção		Tipo da Condição de Contorno
Simulações com Fundo Fixo	1	X	Mínimo	Pressão de Estagnação
			Máximo	Pressão de Estagnação
		Y	Mínimo	Parede
			Máximo	Parede
		Z	Mínimo	Simetria
			Máximo	Simetria
	2	X	Mínimo	Simetria
			Máximo	Simetria
		Y	Mínimo	Parede
			Máximo	Parede
		Z	Mínimo	Simetria
			Máximo	Simetria
Simulações com Fundo Móvel	1	X	Mínimo	Pressão de Estagnação
			Máximo	Simetria
		Y	Mínimo	Parede
			Máximo	Parede
		Z	Mínimo	Parede
			Máximo	Simetria
	2	X	Mínimo	Simetria
			Máximo	Simetria
		Y	Mínimo	Parede
			Máximo	Parede
		Z	Mínimo	Simetria
			Máximo	Simetria
	3	X	Mínimo	Simetria
			Máximo	Pressão de Estagnação
		Y	Mínimo	Parede
			Máximo	Parede
		Z	Mínimo	Simetria
			Máximo	Simetria

FONTE: O autor (2017)

FIGURA 31 – CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO FIXO

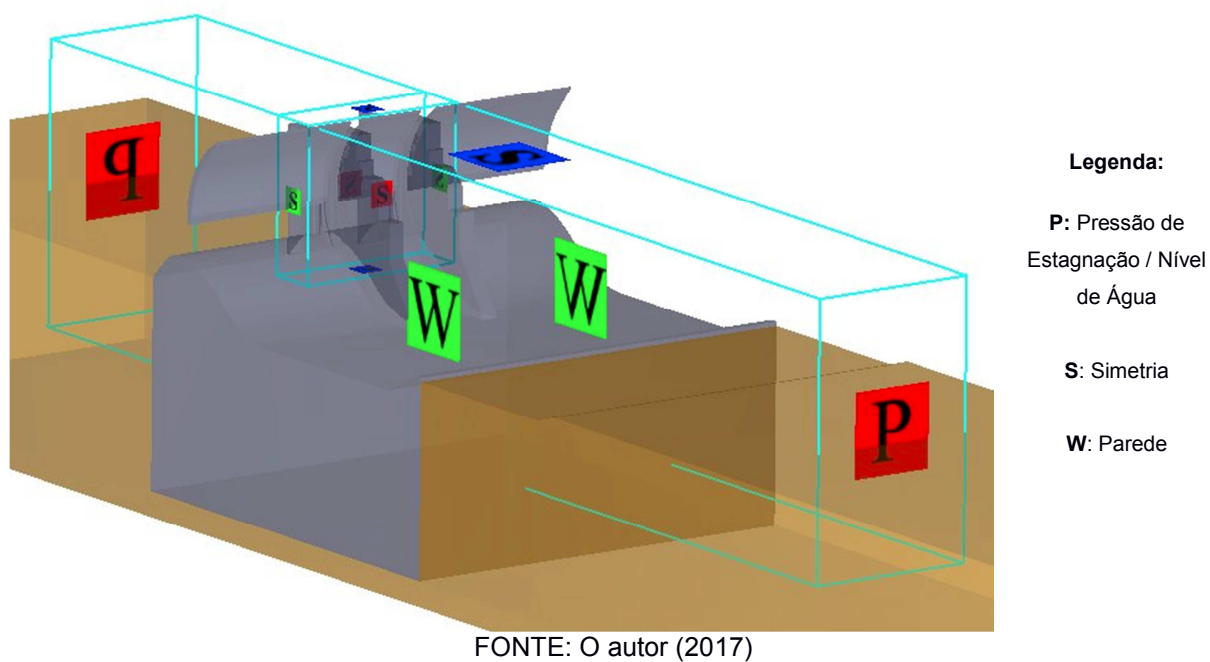


FIGURA 32 – CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO MÓVEL

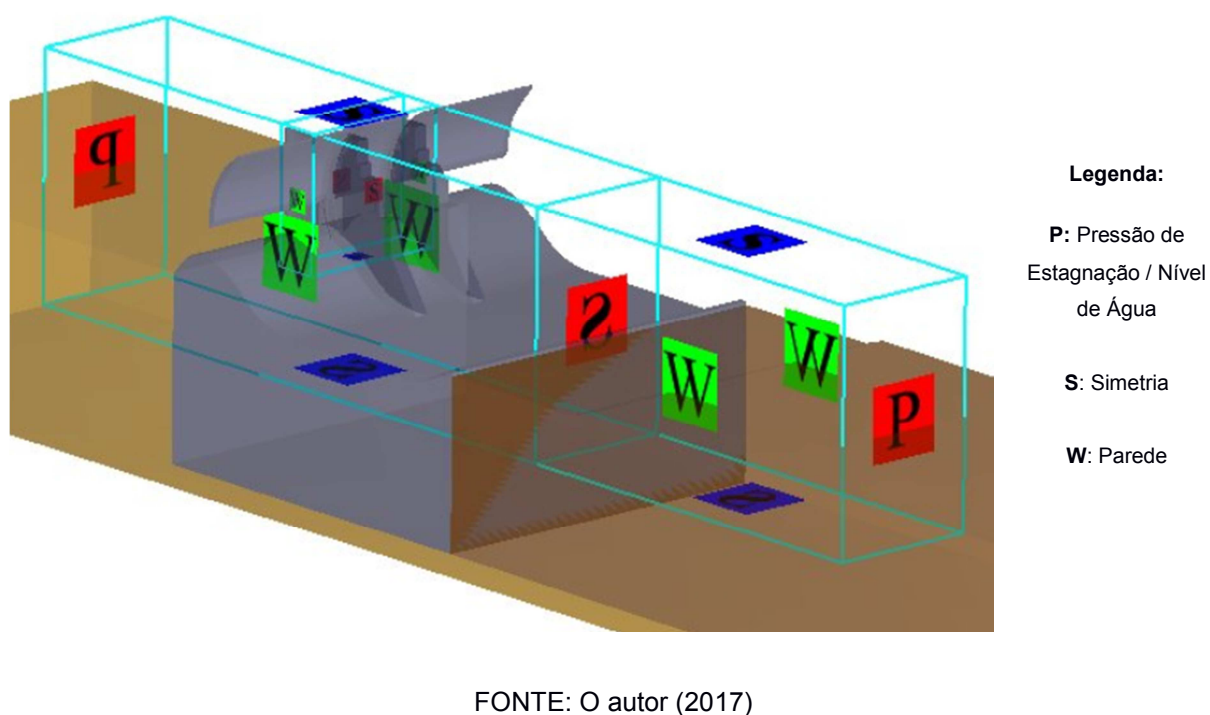


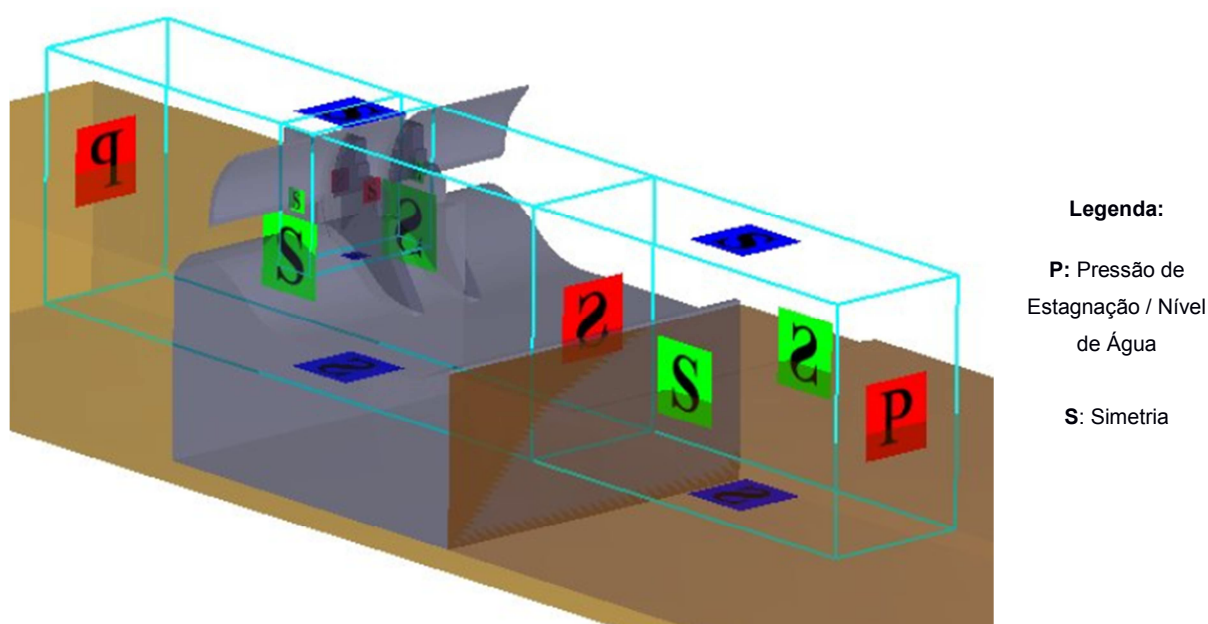
TABELA 10 – NÍVEIS DE ÁGUA IMPOSTOS NAS SIMULAÇÕES

Bloco	Direção		Nível de Água (m)	
			Protótipo	Modelo
1	X	Mínimo	286,77	2,3129
		Máximo	271,15	2,0261

FONTE: O autor (2017)

Adicionalmente, foram realizadas simulações com fundo móvel para uma análise de sensibilidade quanto à condição de contorno nas paredes laterais do modelo (direção Y), sendo nessas simulações adotada a condição de contorno do tipo simetria, conforme apresentado na Figura 33.

FIGURA 33 – CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO MÓVEL – ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DA CONDIÇÃO DE CONTORNO DO MODELO



FONTE: O autor (2017)

3.3.4 Condições Iniciais do Fluido

Com o intuito de se promover uma convergência da simulação numérica de forma mais rápida, com base nas condições de fluxo esperadas ao longo da estrutura, se define condições iniciais de fluxo. Para a presente dissertação, nas simulações realizadas com fundo fixo a jusante da bacia de dissipação do vertedouro optou-se por definir duas regiões com níveis de água constantes no modelo: a primeira região a montante da crista do vertedouro e da comporta com o

nível de água igual à condição de contorno de montante (X_{\min}) e a segunda região, a jusante da comporta, no interior da bacia de dissipação e no canal de restituição do vertedouro com o nível de água igual à condição de contorno na extremidade de jusante (X_{\max}). Os níveis definidos em cada região são apresentados na Tabela 11.

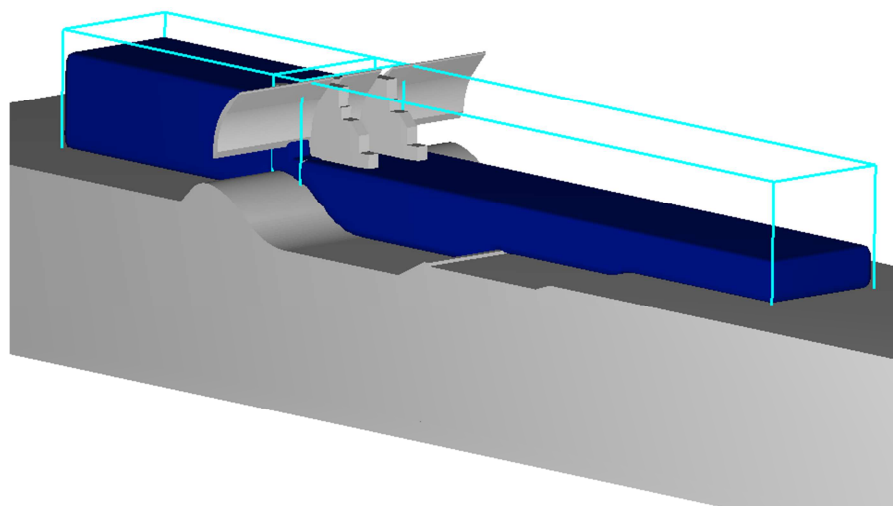
TABELA 11 – CONDIÇÕES INICIAS NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO FIXO

Região	Direção	Limite (m)		Nível de Água (m)	
		Mínimo	Máximo	Protótipo	Modelo Numérico
1	X	2,00	3,60	286,77	2,3129
2	X	3,60	7,00	271,15	2,0261

FONTE: O autor (2017)

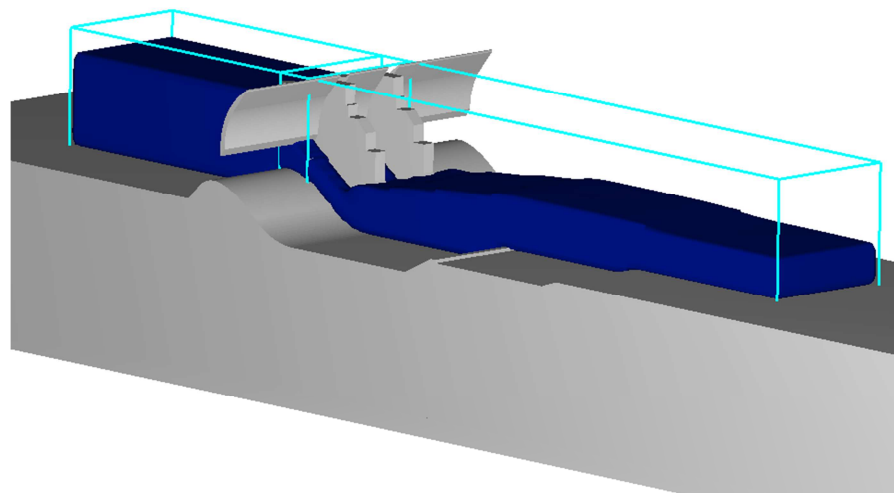
Já para as simulações com a consideração de fundo móvel a jusante do vertedouro, a condição inicial utilizada foi a condição final da simulação com fundo fixo, para ambos os modelos de turbulência adotados nos estudos. Isso foi possível através do comando “*Restart Simulation*”, que permite considerar como condição inicial de escoamento de uma determinada simulação a condição final, com fluxo uniforme, de outra.

FIGURA 34 – CONDIÇÃO INICIAL DO FLUIDO NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO FIXO



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 35 – CONDIÇÃO INICIAL DO FLUIDO NAS SIMULAÇÕES COM FUNDO MÓVEL



FONTE: O autor (2017)

3.3.5 Demais Parâmetros e Premissas Adotados na Simulação

Neste capítulo são apresentados de forma resumida os demais parâmetros e premissas adotados nas simulações realizadas além dos já apresentados ao longo desse capítulo.

A geometria das estruturas foi definida de modo a se permitir a diferenciação da rugosidade das diferentes partes. No modelo físico, o vertedouro, a bacia de dissipação e as comportas foram construídos em acrílico, sendo a altura de rugosidade adotada para essas partes iguais a 0,01 mm. Os canais de aproximação e restituição tiveram sua superfície revestida em argamassa para realização dos ensaios com fundo fixo no modelo físico, sendo a rugosidade adotada de 5 mm. Para as simulações com fundo móvel no canal de restituição do vertedouro, a rugosidade do fundo móvel é função do diâmetro médio do material granular, sendo adotada a relação de 2,5 entre os dois, conforme indicado no manual do software Flow 3D® (Flow Science, 2015), ou seja, como o diâmetro médio do material adotado é 15,9 mm, a rugosidade do leito adotada nessa é de 39,75 mm. Nas análises de sensibilidade do diâmetro do material granular as rugosidades resultantes são de 3,75 mm para a simulação com diâmetro médio de 1,5 mm e 20,00 mm para a simulação com diâmetro médio de 8,0 mm.

Foram realizadas simulações com fundo fixo com dois modelos de turbulência: o modelo $k - \varepsilon$ RNG e o modelo $k - \omega$. Buscando-se uma condição de

fluxo estável para a condição de fundo fixo, foram simulados em modelo numérico 150 segundos.

Nos estudos realizados pelo CEHPAR não são detalhadas as características do material utilizado, sendo que para as simulações com fundo móvel se adotou o peso específico do material granular em 2650 kg/m^3 e o ângulo de repouso do material em 32° . Adicionalmente, se realizou uma simulação numérica para a análise de sensibilidade do ângulo de atrito do material, sendo nessa simulação adotado um ângulo de atrito de 20° , indicado nas referências como um ângulo de atrito mínimo para pedregulhos.

O modelo de transporte de sedimento de fundo adotado para as simulações com fundo móvel foi o modelo proposto por Meyer-Peter e Muller (1948), pois conforme apresentado por Carvalho (2008), o modelo se aplica ao transporte de partículas com diâmetro médio de até 30 mm. Também se efetuou uma simulação com o modelo de transporte de sedimento proposto por Nielsen (1992), pois conforme apresentado por Chanson (1999) a respectiva formulação tem validade para a estimativa do transporte de fundo de materiais com diâmetros compreendidos entre 0,69 e 28,7 mm.

As variáveis adotadas são as apresentadas como padrão pelo software, com exceção do coeficiente empírico do transporte de fundo utilizado na equação de Meyer-Peter Muller, onde foram realizadas simulações com o coeficiente para médio transporte ($\beta_{MPM,n} = 8$) e para alto transporte ($\beta_{MPM,n} = 13$). As variáveis adotadas nas simulações são apresentadas abaixo:

- Coeficiente multiplicador de Richardson-Zaki (ζ_1): 1
- Coeficiente de arraste do sedimento (α_n): 0,018
- Coeficientes empíricos do transporte de fundo:
 - Modelo Meyer-Peter Muller ($\beta_{MPM,n}$): Simulação 1: 8; Simulação 2: 13
 - Modelo Nielsen ($\beta_{Ni,n}$): Simulação 3: 12.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são apresentados os principais resultados das simulações com a consideração de fundo fixo a jusante da bacia de dissipação do vertedouro e das simulações com a consideração de fundo móvel, além das discussões a respeito dos mesmos.

4.1 SIMULAÇÕES COM FUNDO FIXO

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações numéricas com consideração de fundo fixo a jusante da bacia de dissipação do vertedouro que servirão como condição inicial de escoamento para as simulações numéricas com fundo móvel. Esses resultados serão comparados com as medições realizadas no modelo físico para validação das condições iniciais dos ensaios com fundo móvel. Serão analisados os resultados em termos de vazão, pressões ao longo da crista do vertedouro e da bacia de dissipação e níveis de água ao longo do modelo.

Foram realizadas simulações com fundo fixo com dois modelos de turbulência: o modelo $k - \varepsilon$ RNG e o modelo $k - \omega$. Buscando-se uma condição de fluxo estável para a condição de fundo fixo, foram simulados em modelo numérico 150 segundos, sendo os resultados obtidos ao final do tempo de simulação.

Para os resultados de vazão a acurácia será avaliada mediante a as diferenças percentuais obtidas entre os resultados no modelo físico e no modelo numérico, sendo o erro percentual expresso por:

$$Erro = \frac{Q_{físico} - Q_{simulado}}{Q_{físico}} \quad (4-1)$$

onde $Q_{físico}$ é a vazão em m³/s imposta no modelo físico e $Q_{simulado}$ a vazão obtida no modelo numérico mediante a imposição dos níveis de montante, níveis de jusante e abertura da comporta observados no modelo físico.

Para as pressões e os níveis de água ao longo do modelo a avaliação da acurácia dos resultados obtidos a partir das simulações numéricas, além da comparação dos resultados absolutos medidos, será feita através do cálculo da medida estatística “erro quadrático médio”, ou RMS (do inglês “*Root Mean Square*”), definido por:

$$RMS = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{físico,i} - X_{simulado,i})^2}{n} \quad (4-2)$$

onde $X_{físico,i}$ é a grandeza medida no modelo físico, $X_{simulado,i}$ é o resultado obtido na simulação numérica e n é o número de pontos medidos.

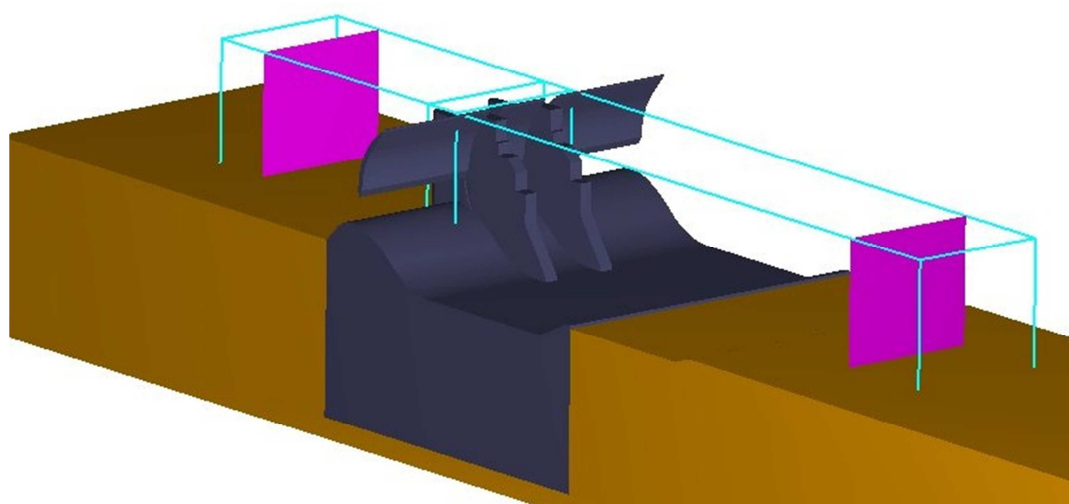
Realizou-se duas simulações para a condição de protótipo com a vazão de 3172 m³/s passando por dois vãos do vertedouro, equivalente a 9515 m³/s respectivamente quando os seis vãos da estrutura estiverem operando. No modelo físico reduzido essa vazão corresponde a 113,7 L/s.

As medições de pressão no modelo físico foram realizadas através da instalação de piezômetros ao longo da crista do vertedouro e da bacia de dissipação. Já a superfície da lâmina da água foi levantada através do registro de níveis ao longo do vertedouro e da bacia de dissipação.

4.1.1 Vazão

No modelo numérico foram obtidas vazões em duas seções ao longo do modelo: a primeira na região a montante da ogiva do vertedouro, a 0,30 metros da extremidade de montante do modelo e a segunda a jusante da bacia de dissipação do mesmo, a 0,50 m da extremidade de jusante do modelo, conforme apresentado na Figura 36.

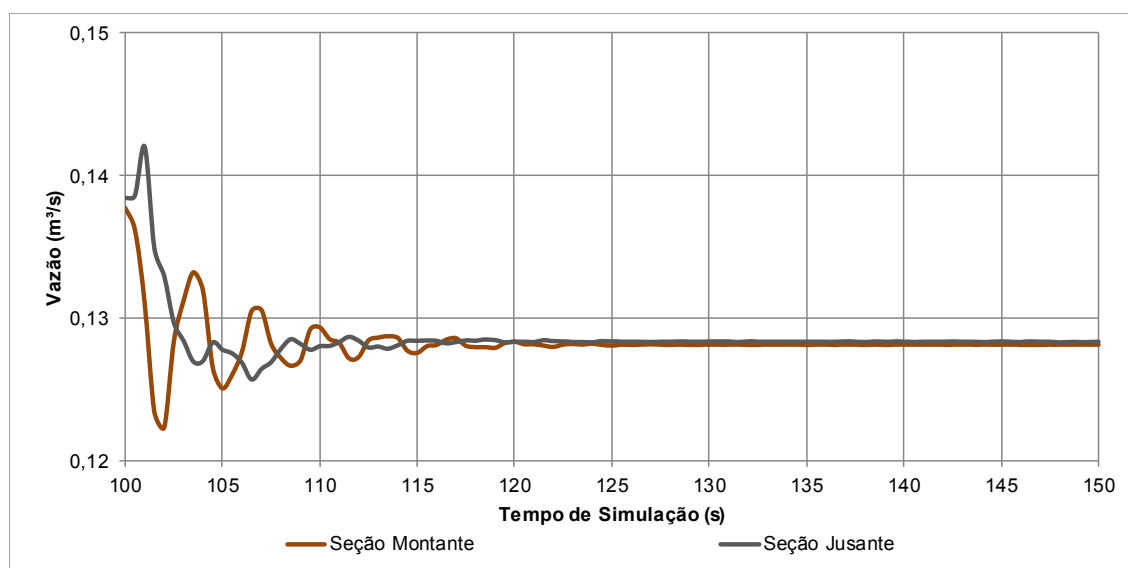
FIGURA 36 – LOCAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO NO MODELO NUMÉRICO



FONTE: O autor (2017)

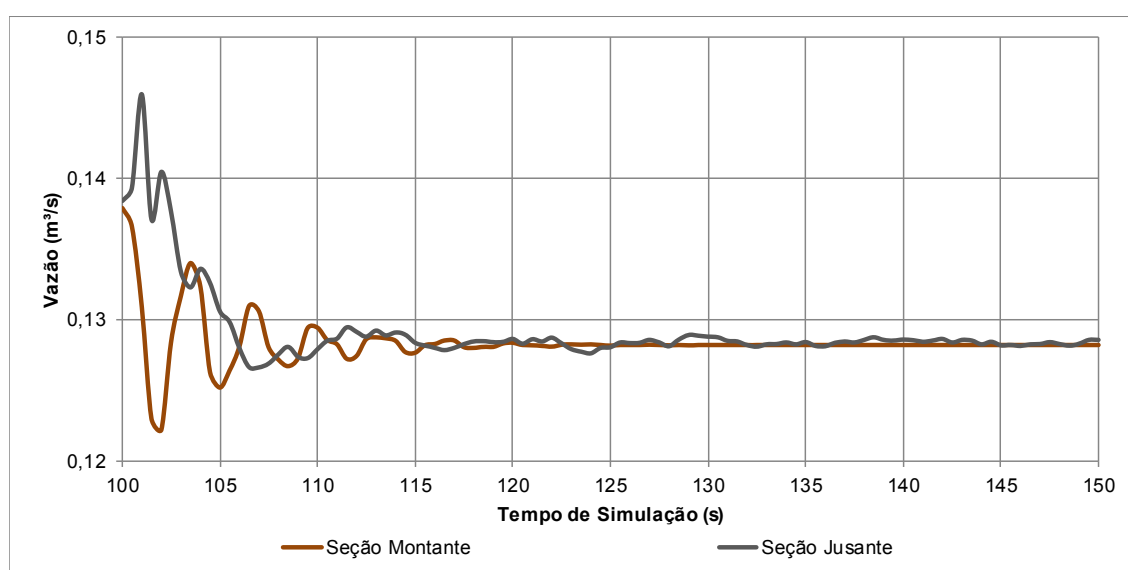
Na Figura 37 é apresentada a variação de vazão nos últimos 50 segundos da simulação com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG. Adotou-se como vazão representativa da simulação a média das vazões nas duas seções de medição, sendo a vazão em cada seção adotada como a média da vazão observada nos últimos 10 segundos de simulação. Na Figura 38 é apresentada a variação de vazão nos últimos 50 segundos da simulação com o modelo de turbulência $k - \omega$.

FIGURA 37 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA VAZÃO NOS ÚLTIMOS 50 SEGUNDOS DA SIMULAÇÃO COM FUNDO FIXO – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \varepsilon$ RNG



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 38 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA VAZÃO NOS ÚLTIMOS 50 SEGUNDOS DA SIMULAÇÃO COM FUNDO FIXO – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$



FONTE: O autor (2017)

Com base na análise dos resultados apresentados na Figura 37 e na Figura 38, pode-se concluir que o modelo matemático apresentou uma condição estável de fluxo ao final do tempo simulado. A Tabela 12 apresenta as vazões correspondentes ao protótipo e ao modelo físico, além do resultado obtido na simulação numérica e o erro calculado.

TABELA 12 – VAZÕES NO MODELO FÍSICO E VAZÕES OBTIDAS NO MODELO NUMÉRICO

Modelo de Turbulência Utilizado	Vazão por 6 Vãos do Vertedouro (m³/s)	Vazão por 2 Vãos do Vertedouro (m³/s)	Vazão no Modelo Físico Parcial (m³/s)	Vazão no Modelo Numérico (m³/s)	Diferença (m³/s)	Erro (%)
$k - \varepsilon$ RNG	9515	3172	0,114	0,128	0,014	12
$k - \omega$	9515	3172	0,114	0,128	0,014	12

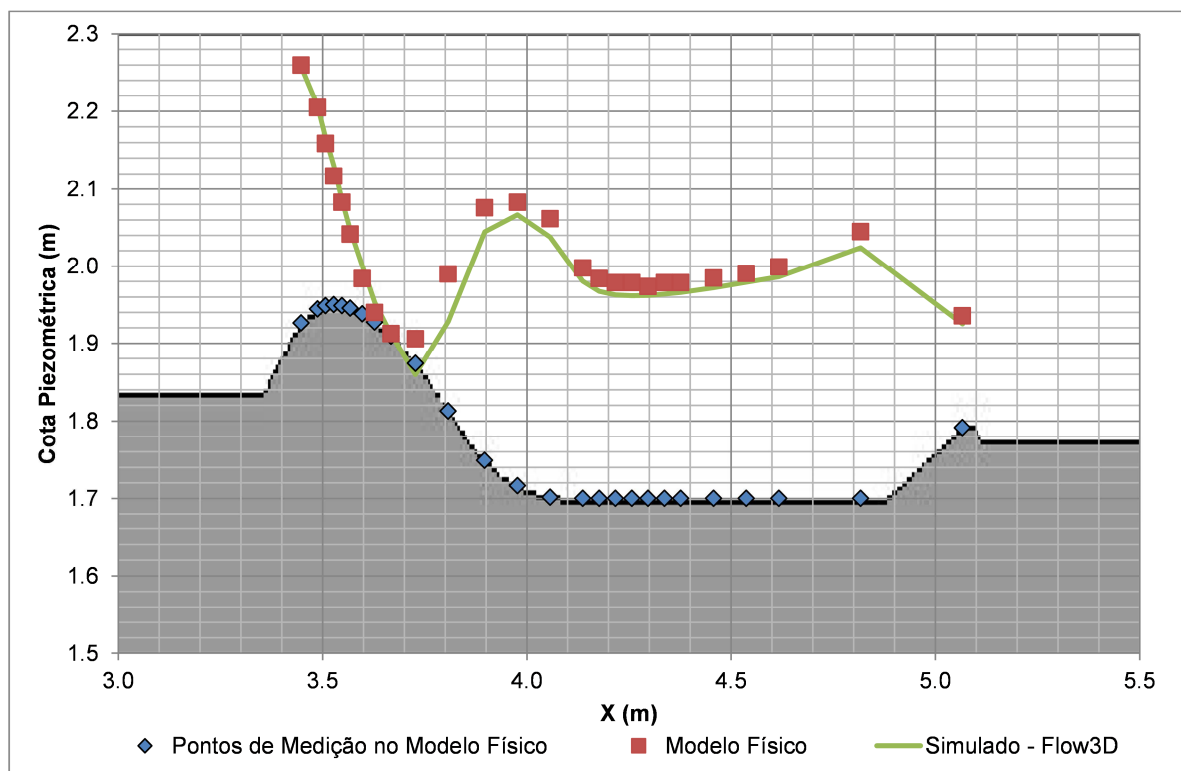
FONTE: O autor (2017)

Conforme pode ser observado na Tabela 12, a diferença percentual entre a vazão utilizada nos ensaios no modelo físico e a vazão obtida nas simulações numéricas foi de 12% em ambos os casos. Tal diferença pode ser atribuída à representação da geometria do modelo numérico na região de controle do fluxo, ou seja, nas comportas do vertedouro. Conforme apresentado no item 3.3.2 dessa dissertação, nessa região foi utilizada uma malha com elementos cúbicos de 0,01 m de aresta. A utilização de uma malha com elementos ainda menores nessa região representaria um aumento de custo computacional significativo, sendo então a diferença obtida admitida nas simulações com fundo móvel.

4.1.2 Pressões ao Longo da Crista do Vertedouro e da Bacia de Dissipação

As linhas piezométricas obtidas experimentalmente e na simulação em modelo numérico a partir do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG para a vazão estudada (113,7 L/s) são apresentadas na Figura 39. No APÊNDICE 1 da presente dissertação são apresentados os valores numéricos das pressões em metros de coluna de água, as cotas piezométricas e as diferenças calculadas entre os resultados do modelo físico e da simulação numérica, além da estatística RMS calculada para a simulação realizada com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG.

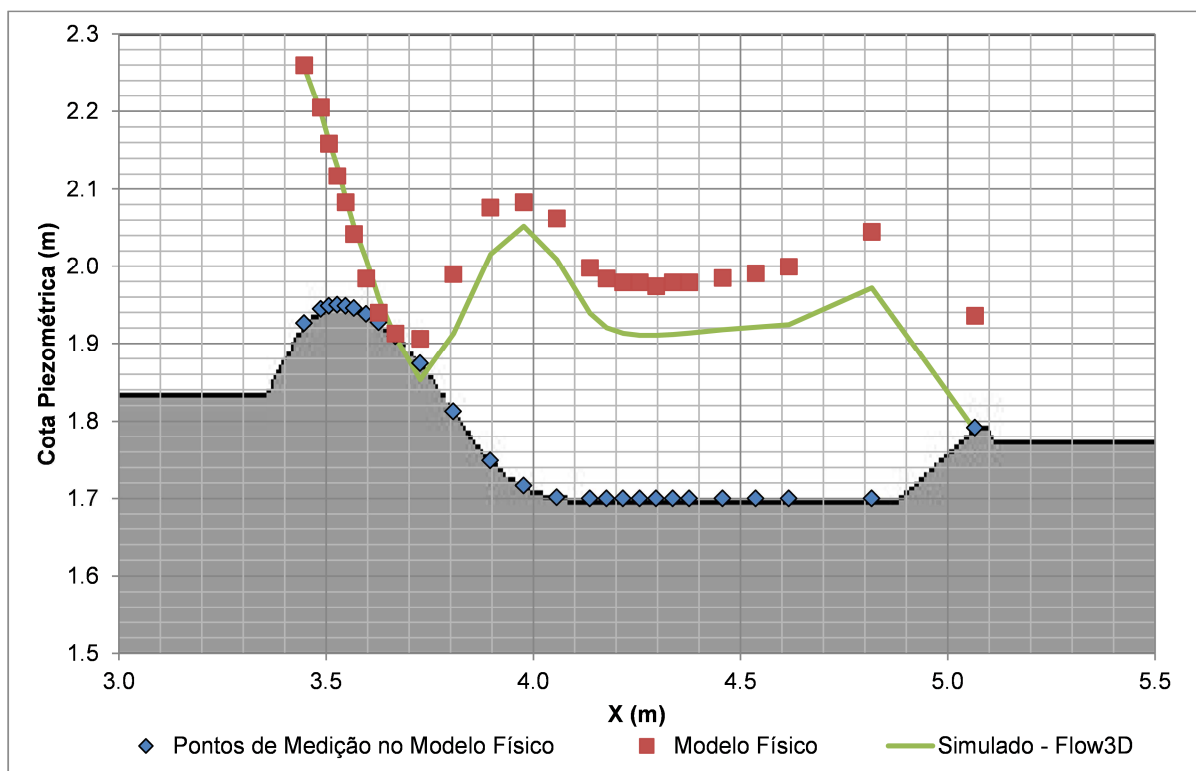
FIGURA 39 – PRESSÕES AO LONGO DA CRISTA DO VERTEDOURO E DA BACIA DE DISSIPACÃO – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \varepsilon$ RNG



FONTE: O autor (2017)

As linhas piezométricas obtidas experimentalmente e na simulação em modelo numérico a partir do modelo de turbulência $k - \omega$ são apresentadas na Figura 40. No APÊNDICE 1 da presente dissertação são apresentados os valores numéricos das pressões em metros de coluna de água, as cotas piezométricas e as diferenças calculadas entre os resultados do modelo físico e da simulação numérica, além da estatística RMS calculada para a simulação realizada com o modelo de turbulência $k - \omega$.

FIGURA 40 – PRESSÕES AO LONGO DA CRISTA DO VERTEDOURO E DA BACIA DE DISSIPACÃO – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$



FONTE: O autor (2017)

Na Tabela 13 são apresentadas as diferenças máximas obtidas nas pressões entre as simulações numéricas e os ensaios em modelo físico em termos absolutos, além do ponto onde essa diferença foi obtida. Adicionalmente, é apresentada a estatística RMS em cada uma das simulações.

TABELA 13 – DIFERENÇAS ENTRE OS RESULTADOS DE PRESSÕES OBTIDOS NO MODELO FÍSICO E NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA - RESUMO

Modelo de Turbulência Utilizado	Vazão por 6 Vãos do Vertedouro (m³/s)	Vazão por 2 Vãos do Vertedouro (m³/s)	Vazão no Modelo Físico Parcial (m³/s)	Diferença Máxima (mca)	Tomada de pressão onde foi Obtida a Diferença Máxima	RMS
$k - \varepsilon$ RNG	9515	3172	0,114	-0,061	8	0,0004
$k - \omega$	9515	3172	0,114	-0,148	26	0,0034

FONTE: O autor (2017)

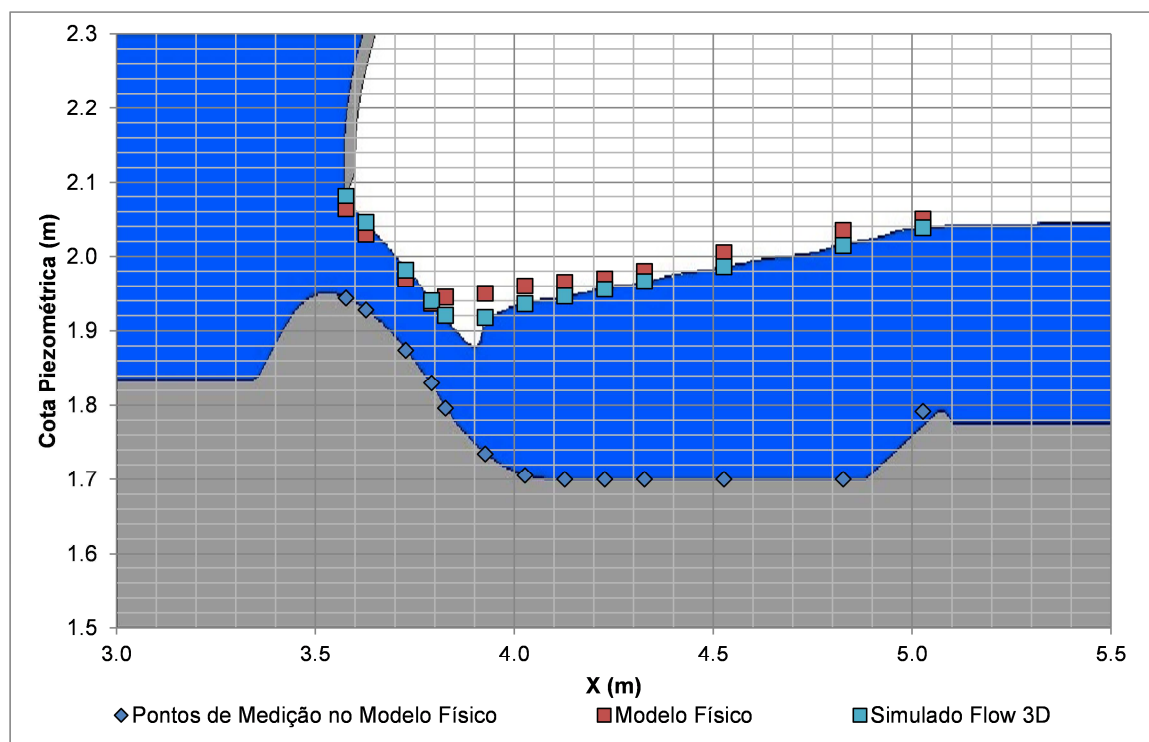
A análise da Tabela 13 permite concluir que, em termos de pressões ao longo do modelo, os resultados obtidos com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG apresentou uma melhor aderência aos resultados obtidos no modelo físico, sendo a

estatística RMS calculada para esse modelo aproximadamente 8,5 vezes menor que a obtida para o modelo $k - \omega$.

4.1.3 Perfil da Linha de Água

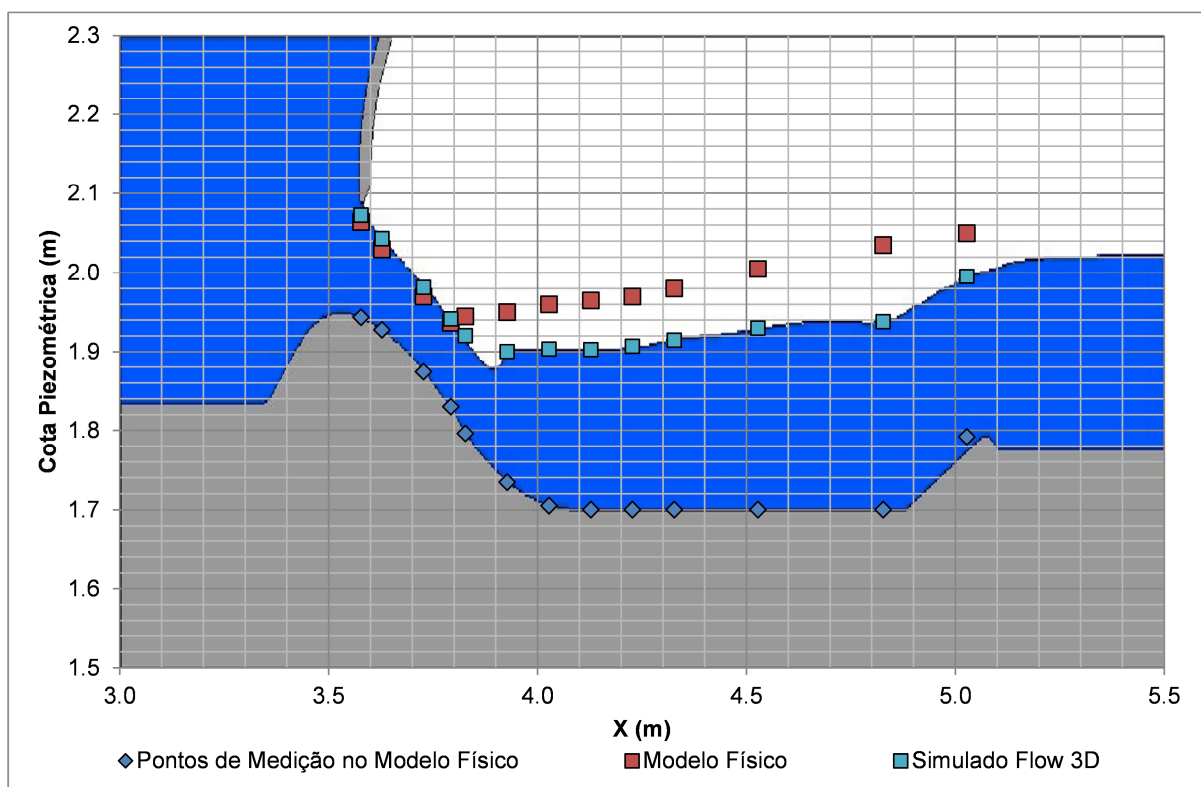
O perfil da linha de água ao longo do vertedouro obtido experimentalmente e na simulação em modelo numérico com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG para a vazão estudada (113,7 L/s) é apresentado na Figura 41. No APÊNDICE 1 da presente dissertação são apresentados os valores numéricos das principais diferenças calculadas entre os resultados obtidos em cada ponto de medição do modelo físico e da simulação numérica, além da estatística RMS calculada.

FIGURA 41 – PERFIL DA LINHA DE ÁGUA AO LONGO DO VERTEDOIRO – $k - \varepsilon$ RNG



FONTE: O autor (2017)

O perfil da linha de água ao longo do vertedouro obtido experimentalmente e na simulação em modelo numérico com o modelo de turbulência $k - \omega$ para a vazão estudada (113,7 L/s) é apresentado na Figura 42. No APÊNDICE 1 da presente dissertação são apresentados os valores numéricos das principais diferenças calculadas entre os resultados obtidos em cada ponto de medição do modelo físico e da simulação numérica, além da estatística RMS calculada.

FIGURA 42 – PERFIL DA LINHA DE ÁGUA AO LONGO DO VERTEDOURO – $k - \omega$ 

FONTE: O autor (2017)

Na Tabela 14 são apresentadas as diferenças máximas obtidas nos perfis da linha de água entre as simulações numéricas e os ensaios em modelo físico em termos absolutos, além do ponto onde essa diferença foi obtida. Adicionalmente, é apresentada a estatística RMS em cada uma das simulações.

TABELA 14 – PERFIL DA LINHA DE ÁGUA AO LONGO DO VERTEDOURO – DIFERENÇAS MÁXIMAS E ERRO MÉDIO QUADRÁTICO - RESUMO

Modelo de Turbulência Utilizado	Vazão por 6 Vãos do Vertedouro (m³/s)	Vazão por 2 Vãos do Vertedouro (m³/s)	Vazão no Modelo Físico Parcial (m³/s)	Diferença Máxima (m)	Ponto onde foi Obtida a Diferença Máxima	RMS
$k - \varepsilon$ RNG	9515	3172	0,114	-0,0323	6	0,0003
$k - \omega$	9515	3172	0,114	-0,0967	12	0,0028

FONTE: O autor (2017)

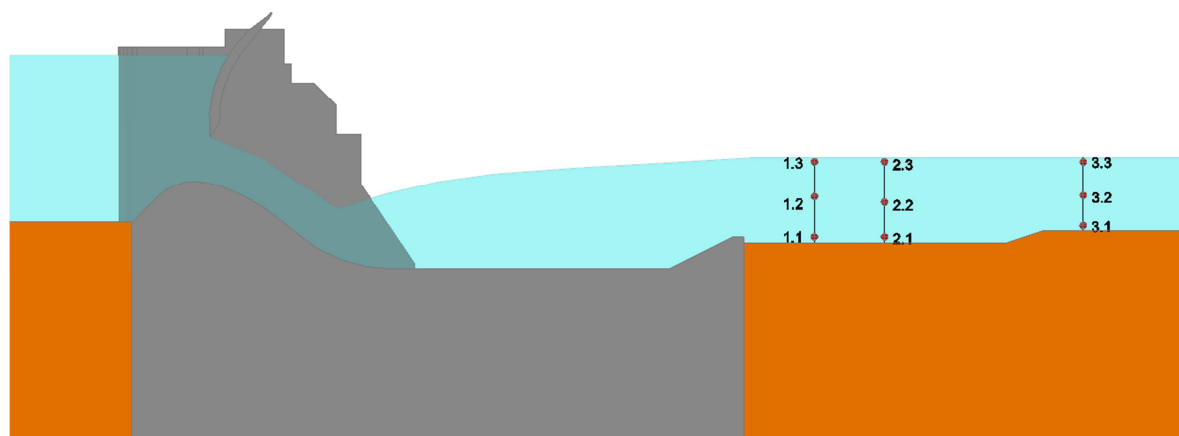
A análise da Tabela 14 permite concluir que o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG apresentou resultados mais aderentes aos encontrados no modelo físico que o modelo de turbulência $k - \omega$, sendo a estatística RMS calculada para o modelo de

turbulência $k - \varepsilon$ RNG cerca de 9 vezes menor que a calculada para o modelo de turbulência $k - \omega$.

4.1.4 Velocidades

Foram medidas no modelo físico as velocidades a jusante da bacia de dissipação do vertedouro para a vazão estudada (113,7 L/s) nos pontos mostrados esquematicamente na Figura 43. As coordenadas desses pontos são apresentadas na Tabela 15. Para permitir a comparação com os resultados obtidos experimentalmente e numericamente, foram coletados resultados em termos de velocidades no modelo numérico nas mesmas posições indicadas.

FIGURA 43 – PONTOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADES



FONTE: O autor (2017)

TABELA 15 – COORDENADAS DOS PONTOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADES

Ponto Medido	Coordenadas (m)		
	X	Y	Z
1.1	5,30	1,32	1,79
1.2	5,30	1,32	1,90
1.3	5,30	1,32	2,01
2.1	5,50	1,32	1,79
2.2	5,50	1,32	1,90
2.3	5,50	1,32	2,01
3.1	6,06	1,32	1,81
3.2	6,06	1,32	1,91
3.3	6,06	1,32	2,01

FONTE: O autor (2017)

A Tabela 16 e a Tabela 17 apresentam as velocidades obtidas no modelo físico e no modelo numérico em cada um dos pontos apresentados na Tabela 15

para as simulações realizadas com os modelos de turbulência $k - \varepsilon$ RNG e $k - \omega$ respectivamente, além do erro percentual obtido em cada uma das simulações.

TABELA 16 – VELOCIDADES MEDIDAS – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \varepsilon$ RNG

Seção	Posição	Ponto	Velocidades (m/s)		Diferença (m/s)	Erro (%)
			Modelo Físico	Modelo Numérico		
1	Fundo	1.1	0,94	0,87	0,07	8
	Meio	1.2	0,77	0,78	0,00	0
	Superfície	1.3	0,46	0,43	0,03	7
2	Fundo	2.1	0,81	0,87	-0,06	-8
	Meio	2.2	0,90	0,74	0,16	18
	Superfície	2.3	0,56	0,53	0,03	5
3	Fundo	3.1	0,81	0,78	0,03	3
	Meio	3.2	0,72	0,87	-0,15	-20
	Superfície	3.3	0,63	0,80	-0,17	-26

FONTE: O autor (2017)

TABELA 17 – VELOCIDADES MEDIDAS – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$

Seção	Posição	Ponto	Velocidades (m/s)		Diferença (m/s)	Erro (%)
			Modelo Físico	Modelo Numérico		
1	Fundo	1.1	0,94	0,62	0,32	34
	Meio	1.2	0,77	1,18	-0,40	-52
	Superfície	1.3	0,46	0,27	0,19	42
2	Fundo	2.1	0,81	0,74	0,08	9
	Meio	2.2	0,90	1,20	-0,30	-33
	Superfície	2.3	0,56	0,43	0,13	23
3	Fundo	3.1	0,81	0,85	-0,04	-5
	Meio	3.2	0,72	1,30	-0,58	-80
	Superfície	3.3	0,63	0,71	-0,08	-12

FONTE: O autor (2017)

A análise da Tabela 16 e da Tabela 17 permite concluir que a simulação com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG apresentou menores diferenças em relação aos resultados do modelo físico. Principalmente na região das seções 1 e 2, onde os resultados no modelo físico indicou maior movimentação de material solto, as velocidades obtidas no modelo numérico junto ao fundo são da mesma ordem de grandeza das velocidades obtidas no modelo físico.

4.2 SIMULAÇÕES COM FUNDO MÓVEL

Nos ensaios realizados em modelo físico a geometria resultante na região implantada em fundo móvel foi caracterizada através de fotografias, com marcação

das curvas de nível de metro em metro. Além desses registros, foi realizada medição de um perfil longitudinal passando pelo eixo do vão central do vertedouro.

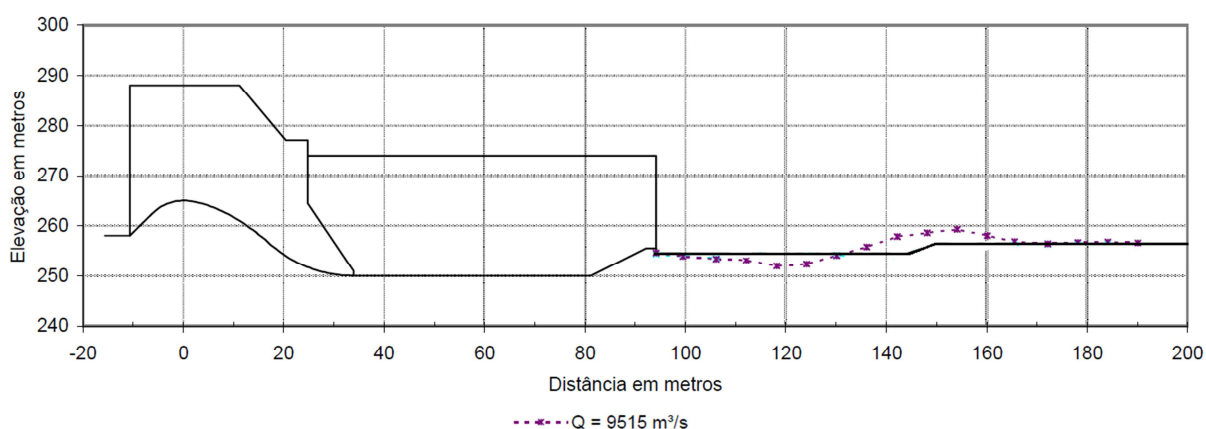
A Figura 44 apresenta os registros fotográficos realizados para o ensaio com a vazão de 113,7 L/s enquanto a Figura 45 apresenta o corte longitudinal obtido no modelo físico.

FIGURA 44 – REGISTROS FOTOGRÁFICOS REALIZADOS EM MODELO FÍSICO – VAZÃO DE 113,7 L/S



FONTE: CEHPAR (2002)

FIGURA 45 – CORTE LONGITUDINAL PELO CENTRO DO VÃO CENTRAL DO VERTEDOURO APÓS O ENSAIO/SIMULAÇÃO – VAZÃO DE 113,7 L/S



FONTE: Adaptado de CEHPAR (2002)

Inicialmente, foram realizadas três simulações numéricas com fundo móvel a jusante da bacia de dissipação do vertedouro para a vazão de 113,7 L/s por

3000 segundo (50 minutos) com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG, uma vez que esse foi o modelo de turbulência que melhor representou as condições hidrodinâmicas observadas no modelo físico. Essas simulações serviram para a comparação com os resultados obtidos no modelo físico, uma vez que o tempo simulado é igual ao tempo de duração do ensaio.

Numa segunda etapa foram realizadas nove (9) simulações com duração de 600 segundos (10 minutos) para análise de sensibilidade de parâmetros como ângulo de atrito do material, modelo de turbulência adotado, condições de contorno laterais do modelo e diâmetro médio do material solto.

4.2.1 Simulações com 50 minutos de duração

Em uma primeira etapa, foram realizadas três simulações numéricas com fundo móvel a jusante da bacia de dissipação do vertedouro para a vazão de 113,7 L/s por 3000 segundo (50 minutos). A Tabela 18 apresenta as simulações realizadas e os principais parâmetros adotados em cada uma.

TABELA 18 – SIMULAÇÕES REALIZADAS NO MODELO NUMÉRICO

Simulação	Vazão		Diâmetro Médio do Fundo Móvel		Ângulo de Atrito do Material	Equação de Transporte de Fundo	Coeficiente de Transporte de Fundo β_n
	Protótipo (6 Vãos) (m³/s)	Modelo (2 Vãos) (L/s)	Protótipo (m)	Modelo (mm)			
1	9515	114	0,954	15,9	32	MPM	8
2	9515	114	0,954	15,9	32	MPM	13
3	9515	114	0,954	15,9	32	NI	12

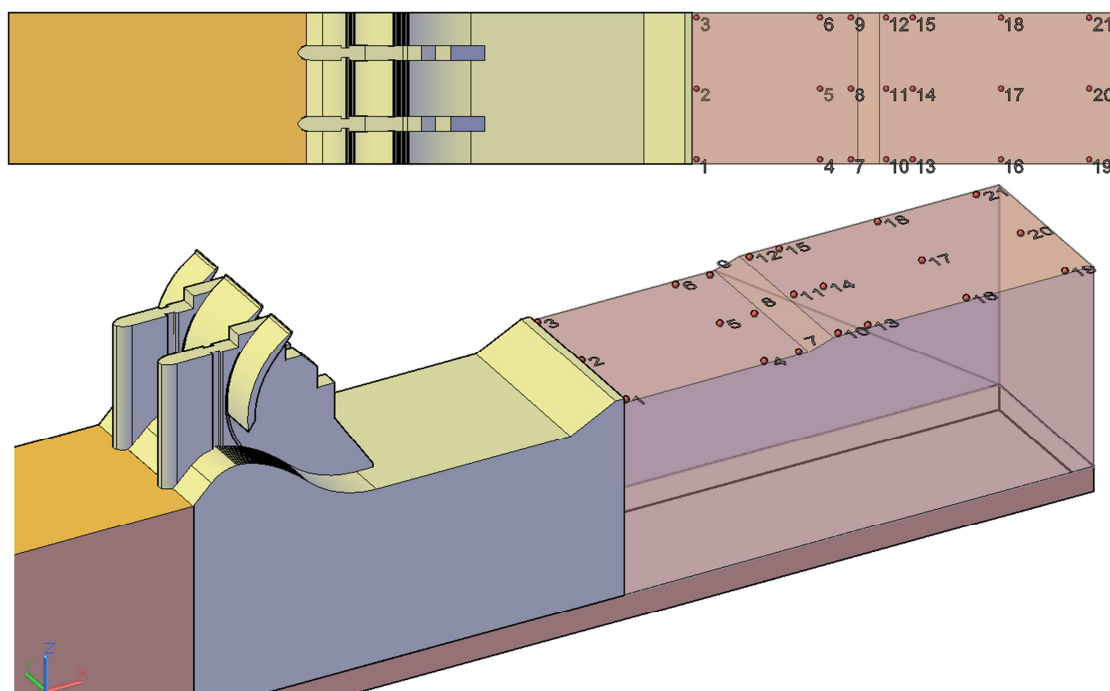
MPM = Meyer-Peter Muller

NI = Nielsen

FONTE: O autor (2017)

A partir dos resultados das três simulações numéricas extraiu-se da cota do terreno em 21 pontos, denominados “Pontos de Controle”, para observação da evolução das erosões/deposições ao longo do tempo de simulação. A localização dos Pontos de Controle é apresentada na Figura 46 e na Tabela 19.

FIGURA 46 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE DAS ALTERAÇÕES NO FUNDO AO LONGO DO TEMPO



FONTE: O autor (2017)

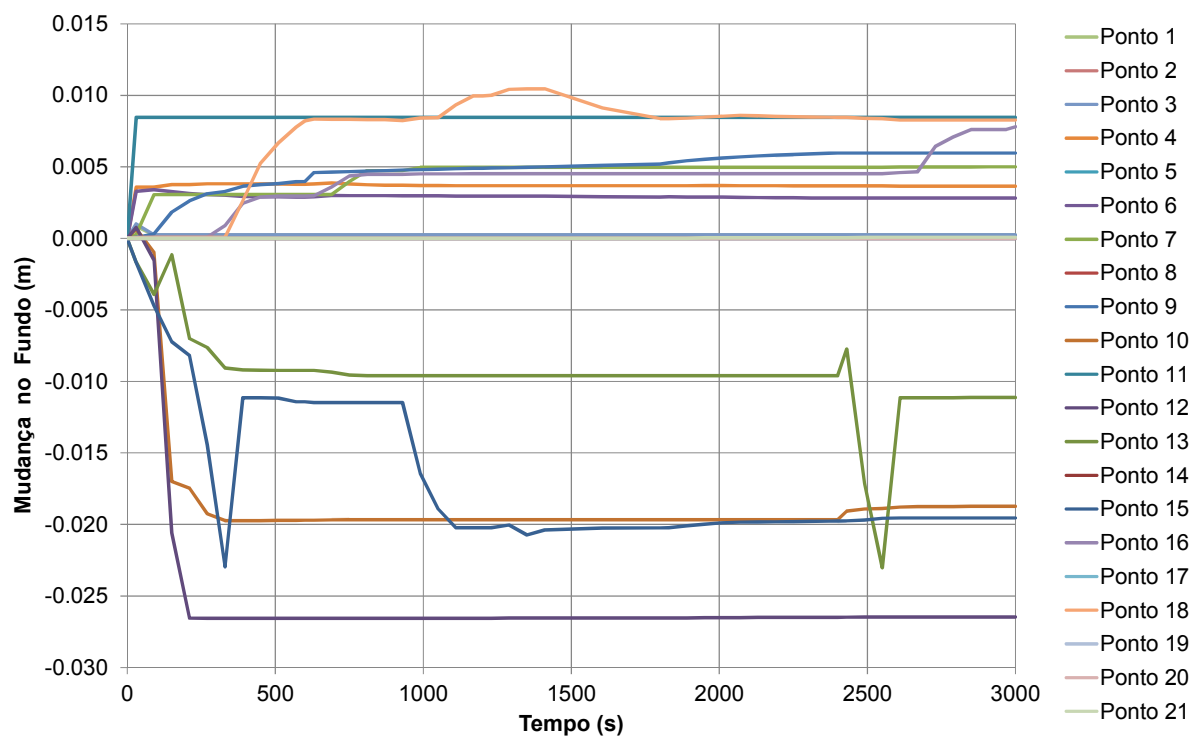
TABELA 19 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE DAS ALTERAÇÕES NO FUNDO AO LONGO DO TEMPO

Ponto de Controle	Coordenadas (metros)		
	X	Y	Z
1	5,12	1,00	1,77
2	5,12	1,32	1,77
3	5,12	1,64	1,77
4	5,68	1,00	1,77
5	5,68	1,32	1,77
6	5,68	1,64	1,77
7	5,82	1,00	1,77
8	5,82	1,32	1,77
9	5,82	1,64	1,77
10	5,98	1,00	1,81
11	5,98	1,32	1,81
12	5,98	1,64	1,81
13	6,10	1,00	1,81
14	6,10	1,32	1,81
15	6,10	1,64	1,81
16	6,50	1,00	1,81
17	6,50	1,32	1,81
18	6,50	1,64	1,81
19	6,90	1,00	1,81
20	6,90	1,32	1,81
21	6,90	1,64	1,81

FONTE: O autor (2017)

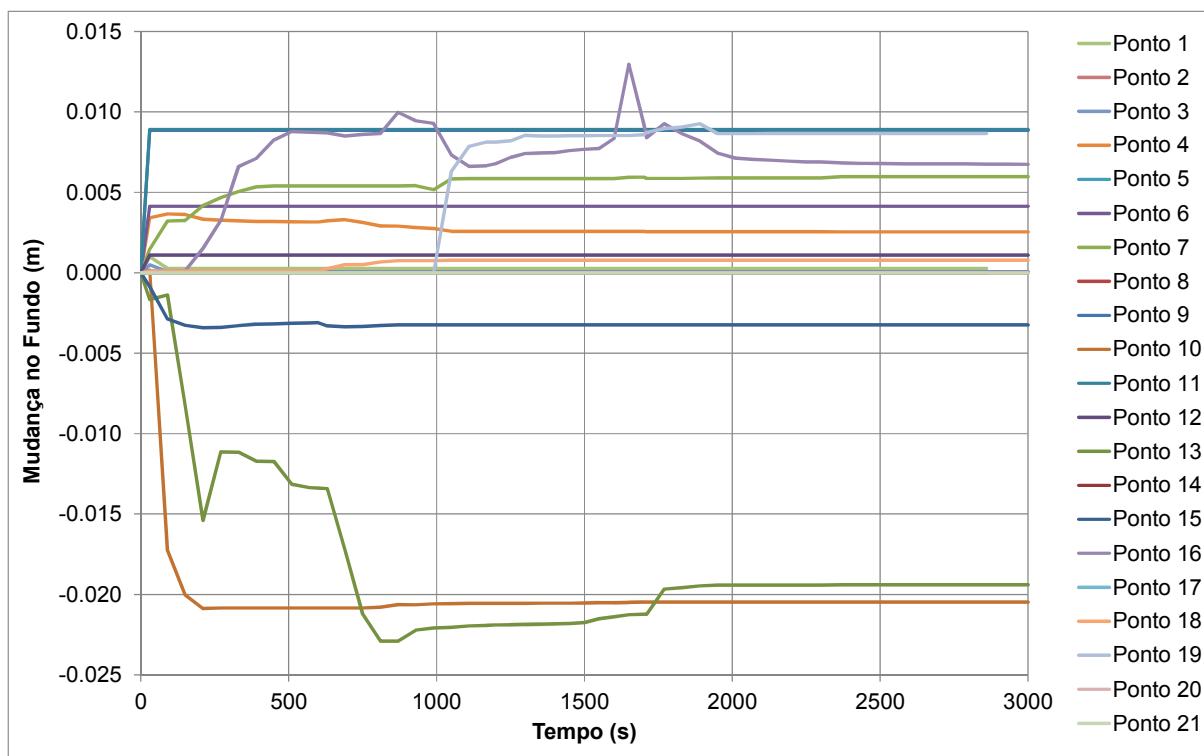
Os resultados em termos de diferença na elevação do terreno em relação ao instante inicial da simulação obtido em cada Ponto de Controle ao longo do tempo para cada uma das simulações realizadas são apresentados na Figura 47, na Figura 48 e na Figura 49.

FIGURA 47 – MUDANÇA NA ELEVÇÃO DO FUNDO AO LONGO DO TEMPO – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 8$



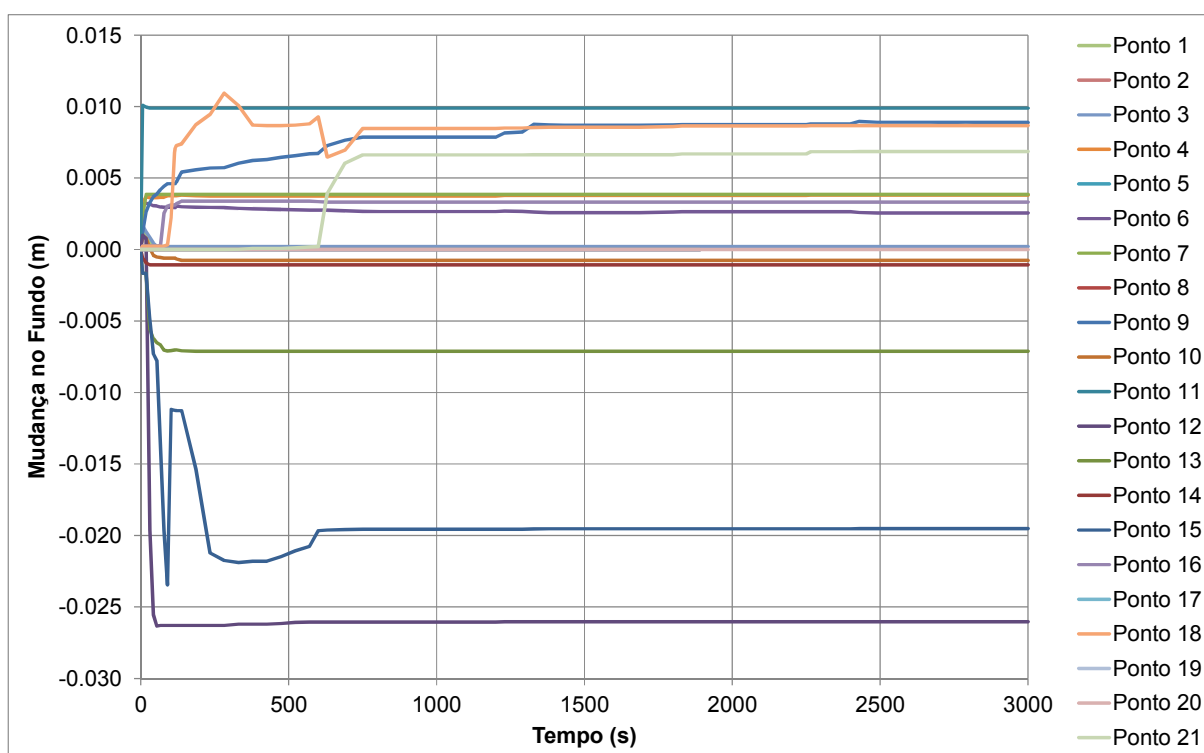
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 48 – MUDANÇA NA ELEVÇÃO DO FUNDO AO LONGO DO TEMPO – SIMULAÇÃO 2 –
MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 13$



FONTE: O autor (2017)

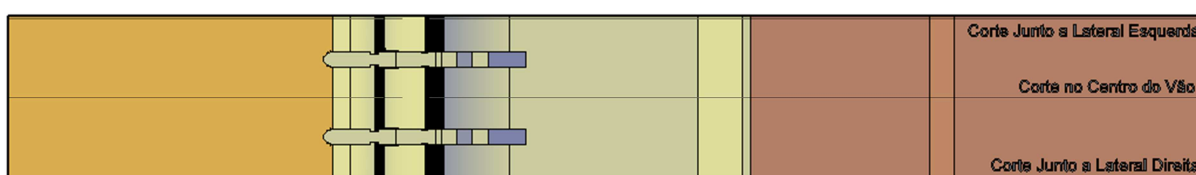
FIGURA 49 – MUDANÇA NA ELEVÇÃO DO FUNDO AO LONGO DO TEMPO – SIMULAÇÃO 3 –
NIELSEN - $\beta_{NI,n} = 12$



FONTE: O autor (2017)

Adicionalmente aos resultados obtidos nos Pontos de Controle ao longo dos 50 minutos de simulação, no APÊNDICE 2 são apresentados os resultados em todo o modelo em planta e em três cortes longitudinais conforme apresentado esquematicamente na Figura 50. No APÊNDICE 4 é apresentado para cada uma das simulações o perfil de velocidades ao longo do modelo no centro do vão, além das linhas de corrente.

FIGURA 50 – LOCALIZAÇÃO DOS CORTES PARA APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

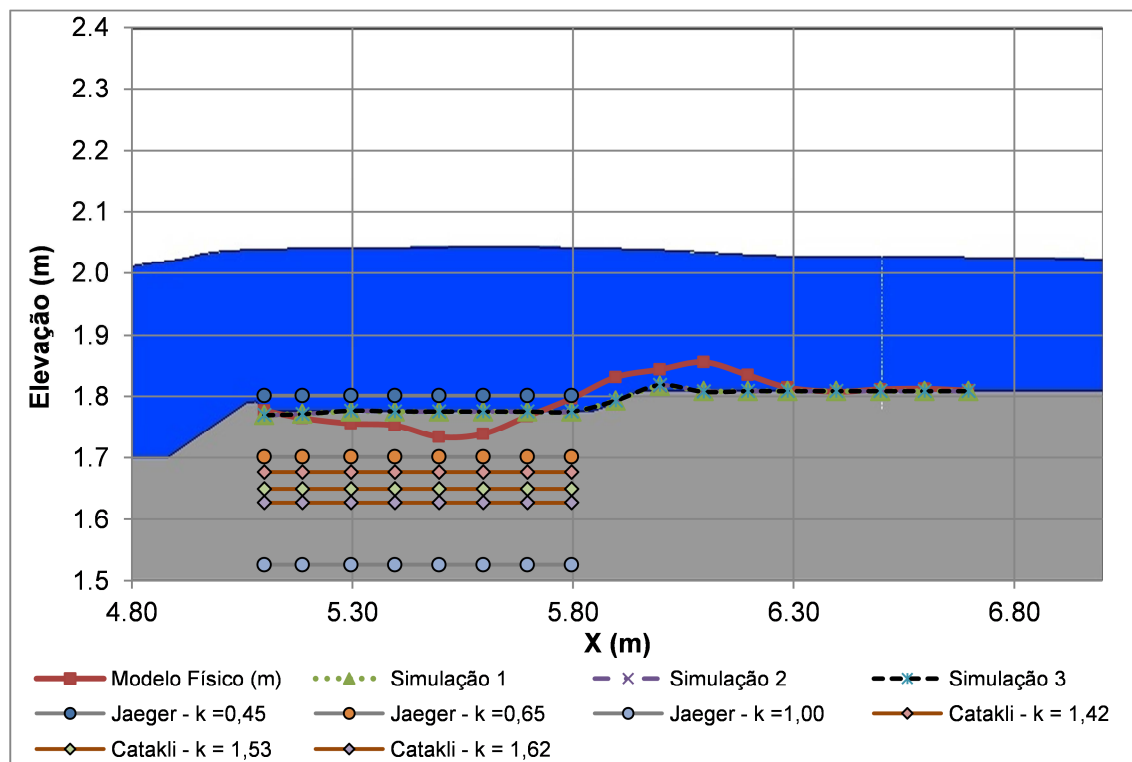


FONTE: O autor (2017)

Conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 47, da Figura 48 e da Figura 49, as mudanças mais significativas no fundo móvel ocorrem ao longo dos dez (10) primeiros minutos de simulação. Portanto, os resultados para as simulações 1, 2 e 3 são apresentados ao final dos 10 primeiros minutos de simulação e ao final dos 50 minutos de simulação.

Na Figura 51 são apresentados os cortes longitudinais no meio do vão central do vertedouro em cada uma das três simulações realizadas no modelo numérico juntamente com a configuração inicial do fundo móvel e os resultados obtidos no modelo físico. No APÊNDICE 2 são apresentados esses resultados de forma numérica e o cálculo da estatística RMS para cada uma das simulações. Adicionalmente aos resultados obtidos no modelo físico e na simulação numérica são apresentados na Figura 51 as profundidades de erosão estimadas através das fórmulas empíricas apresentadas no item 2.1.1 da presente dissertação. Foram eleitas as formulações apresentadas por Novak (1961) e Catakli (1973), sendo apresentadas as estimativas com a variação do valor do k .

FIGURA 51 – CORTE LONGITUDINAL NO VÃO CENTRAL DO VERTEDOURO - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E MODELO FÍSICO COM FUNDO MÓVEL



FONTE: O autor (2017)

Os resultados apresentados indicam que as diferenças encontradas entre as três simulações numéricas são pequenas, sendo inclusive o erro médio quadrado calculado para as simulações iguais a 0,0006. Entretanto, as simulações numéricas subestimaram as erosões e deposições observadas no modelo físico. Junto ao final da bacia de dissipação, no Ponto 1, as erosões observadas no modelo físico foram pequenas, sendo esse ponto específico bem representado pelo modelo numérico. Nas definições de projeto essa é uma região de extrema importância, uma vez que a fundação da estrutura da bacia de dissipação deve ser preservada. Na região central do patamar do canal logo a jusante da bacia de dissipação, entre os pontos 3 e 7, foram observadas as maiores profundidades de erosão no modelo físico, com diferenças da ordem de -3,7 cm, enquanto nas simulações numéricas não foram observadas alterações significativas nas elevações do terreno. Já na região da rampa, onde foram observadas deposição de material no modelo físico, entre os pontos 8 e 13, as simulações subestimaram o volume de material depositado, sendo as diferenças na elevação entre o modelo físico e as simulações de 4,7 cm.

4.2.2 Simulações com 10 minutos de duração – Análise de Sensibilidade

Adicionalmente às simulações para comparação dos resultados com os registros do modelo físico, foram realizadas simulações para uma análise de sensibilidade do modelo quanto ao ângulo de atrito do material móvel, das condições de contorno laterais do modelo, do modelo de turbulência utilizado para a resolução do problema e do diâmetro médio do material móvel utilizado. O tempo simulado em cada uma das análises foi de 300 segundos (10 minutos), uma vez que nas simulações realizadas na etapa anterior pôde-se observar que as principais alterações em termos de elevação do canal ocorreram nessa faixa de tempo. A Tabela 20 apresenta as simulações realizadas e os parâmetros adotados.

TABELA 20 – SIMULAÇÕES REALIZADAS NO MODELO NUMÉRICO – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Simulação	Vazão		Diâmetro Médio do Fundo Móvel		Ângulo de Atrito do Material	Equação de Transporte de Fundo	Modelo de Turbulência Utilizado	Condição de Contorno Lateral
	Protótipo (6 Vãos) (m³/s)	Modelo (2 Vãos) (L/s)	Protótipo (m)	Modelo (mm)				
4	9515	114	0,954	15,9	32	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Simetria
5	9515	114	0,954	15,9	20	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Parede
6	9515	114	0,954	15,9	20	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Simetria
7	9515	114	0,954	15,9	32	MPM	$k - \omega$	Parede
8	9515	114	0,954	15,9	32	MPM	$k - \omega$	Simetria
9	9515	114	0,09	1,5	32	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Parede
10	9515	114	0,09	1,5	32	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Simetria
11	9515	114	0,48	8,0	32	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Parede
12	9515	114	0,48	8,0	32	MPM	$k - \varepsilon$ RNG	Simetria

MPM = Meyer-Peter Muller

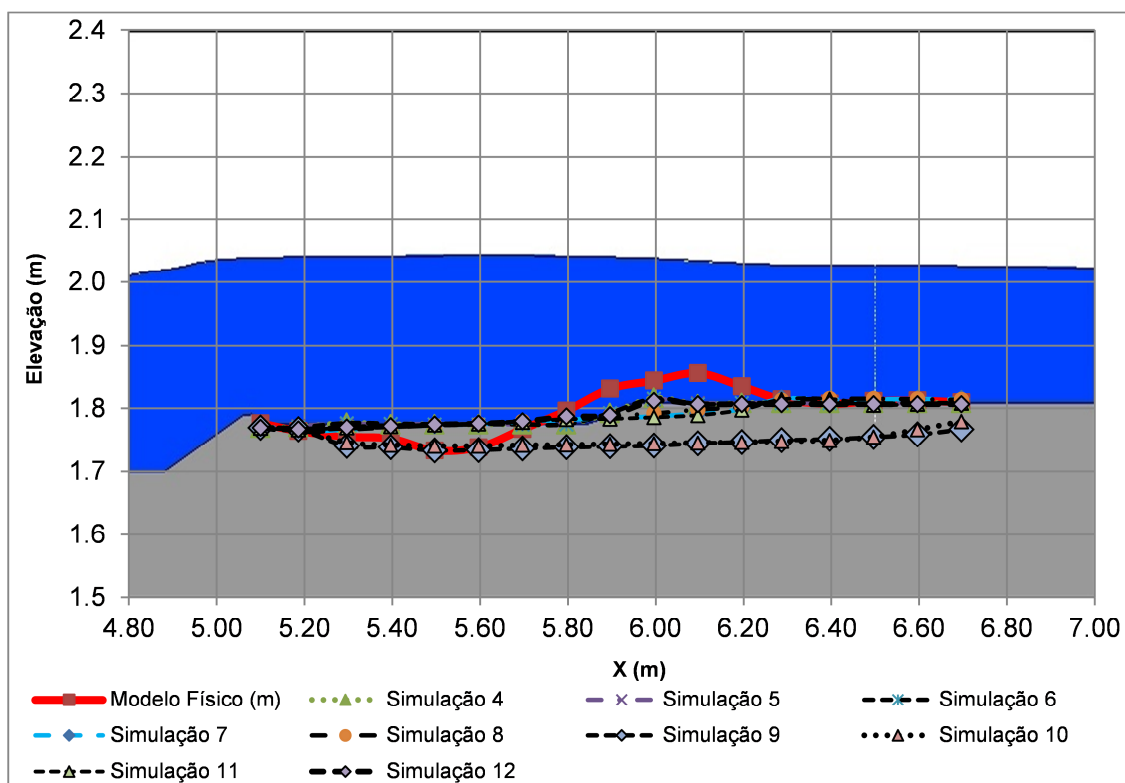
FONTE: O autor (2017)

No APÊNDICE 3 da presente dissertação são apresentados os resultados em todo o modelo em planta e em três cortes longitudinais conforme apresentado esquematicamente no item 4.2.1 - Figura 50 da presente dissertação. No APÊNDICE 4 é apresentado para cada uma das simulações o perfil de velocidades ao longo do modelo no centro do vão, além das linhas de corrente.

Adicionalmente aos resultados apresentados, a Figura 52 apresenta uma comparação entre os cortes longitudinais obtidos no centro do modelo ao final de cada uma das simulações com 10 minutos para as análises de sensibilidade. Como

referência, são também apresentados os resultados observados no modelo físico para o ensaio com duração de 50 minutos.

FIGURA 52 – CORTE LONGITUDINAL NO VÃO CENTRAL DO VERTEDOURO - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E MODELO FÍSICO COM FUNDO MÓVEL – ANÁLISES DE SENSIBILIDADE



FONTE: O autor (2017)

O erro médio quadrado obtido nas simulações 4, 5 e 6, realizadas com duração de 10 minutos para a análise de sensibilidade são da mesma ordem de grandeza das simulações realizados com duração de 50 minutos (simulações 1, 2 e 3), iguais a 0,0006. Cabe notar que as simulações 4, 5 e 6 foram realizadas com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG, o mesmo utilizado nas simulações 1, 2 e 3, enquanto as simulações 7 e 8 foram realizadas com o modelo de turbulência $k - \omega$, que apresentou erros médios quadrados maiores, de 0,0008 e 0,0007 respectivamente. O modelo de turbulência $k - \omega$ nas simulações com fundo fixo, que serviram de condição inicial para as simulações com fundo móvel, também apresentou maiores diferenças nas condições hidrodinâmicas resultantes.

Já as simulações 9, 10, 11 e 12 buscou avaliar a sensibilidade do modelo quanto ao diâmetro médio do material granular utilizado nas simulações. Nas

simulações 9 e 10, com diâmetro médio de 1,5 mm, aproximadamente 10 vezes menor que o diâmetro médio utilizado nas simulações anteriores, a erosão resultante foi da mesma ordem de grandeza da erosão obtida no modelo físico, entretanto, a erosão se propagou para outras regiões onde o modelo físico indicava a ocorrência de deposição do material. O erro médio quadrado calculado para essas simulações foi de 0,0035 e 0,0032 respectivamente, da ordem de 5 vezes maior que o erro médio quadrado obtido para as simulações 4, 5 e 6. Nas simulações 11 e 12 foi adotado o diâmetro médio de 8,0 mm, aproximadamente metade do diâmetro médio adotado nas demais simulações. Os resultados para essas simulações se aproximaram bastante dos resultados para as simulações 4, 5 e 6, e consequentemente, dos resultados das simulações 1, 2 e 3.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As condições hidráulicas foram simuladas com a consideração de fundo fixo a jusante da bacia de dissipação do vertedouro para a vazão de 113,7 L/s ensaiada no modelo físico. Foram realizadas simulações com dois modelos de turbulência distintos: 1) $k - \varepsilon$ RNG e 2) $k - \omega$.

A simulação realizada com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG resultou em condições de fluxo muito próximas às observadas no modelo físico, com a vazão obtida no modelo numérico 12 % maior que a vazão do modelo físico, sendo a maior diferença observada na pressão ao longo da estrutura do vertedouro e bacia de dissipação igual -0,061 mca e o erro médio quadrado calculado para as pressões igual a 0,0004 mca, e para o nível de água a maior diferença encontrada ao longo da estrutura foi de -0,0323 m, com erro médio quadrado calculado igual a 0,0003 m. As velocidades obtidas no modelo matemático foram da mesma ordem de grandeza das velocidades medidas no modelo físico, sendo a maior diferença de 0,17 m/s.

A simulação realizada com o modelo de turbulência $k - \omega$ resultou em uma vazão 12% maior que a observada no modelo físico. Embora a diferença em termos de vazão tenha resultado bastante próxima à diferença encontrada na simulação com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG, em termos de pressão e níveis de água ao longo do modelo as diferenças encontradas foram consideravelmente maiores. Nos resultados relativos as pressões ao longo do modelo, a maior diferença encontrada foi de -0,0148 mca, sendo o erro médio quadrático calculado igual a 0,0034 mca. Em

termos de níveis de água ao longo do modelo a maior diferença encontrada foi de -0,0967 m e o respectivo erro médio quadrático igual a 0,0028 m. As velocidades obtidas no modelo matemático com o modelo de turbulência $k - \omega$ diferiram mais das velocidades medidas no modelo físico que as velocidades obtidas no modelo matemático com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG, sendo a maior diferença de 0,58 m/s.

As diferenças encontradas nas condições hidráulicas obtidas na simulação numérica com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG foram menores, sendo os resultados obtidos nessa simulação mais próximos aos resultados obtidos no modelo físico.

A partir das condições de fluxo obtidas nas simulações com fundo fixo, buscou-se avaliar a capacidade do modelo em simular a erosão e deposição de material móvel que ocorre a jusante da bacia de dissipação do vertedouro. A avaliação foi feita mediante três simulações no modelo Flow 3D® com o módulo de transporte de sedimentos ativado, sendo as simulações realizadas com a mesma duração dos ensaios em modelo físico, igual a 50 minutos (3000 segundos).

Na simulação 1 onde foi utilizado o modelo de transporte de sedimentos de fundo proposto por Meyer-Peter Muller (1948) com o coeficiente de transporte de fundo $\beta_{MPM,n} = 8$, a máxima diferença encontrada entre os resultados de modelo físico e os resultados da simulação com base no corte longitudinal na região central do modelo foi de -3,7 cm na região onde no modelo físico foram observadas erosões e de 4,7 cm na região onde no modelo físico foram observadas deposições.

Na simulação 2 onde foi utilizado o modelo de transporte de sedimentos de fundo proposto por Meyer-Peter Muller (1948) com o coeficiente de transporte de fundo $\beta_{MPM,n} = 13$ e na simulação 3 onde foi utilizado o modelo de transporte de sedimentos de fundo proposto por Nielsen (1992) os resultados obtidos foram muito similares aos da simulação 1, sendo o erro médio quadrado para as três simulações de 0,0006.

Adicionalmente as simulações com duração de 50 minutos, foram realizadas cinco simulações com fundo móvel com duração de 10 minutos, uma vez que, conforme observado nas três primeiras simulações, é nesse intervalo de tempo que ocorreram as principais alterações no fundo móvel.

As simulações foram realizadas com o objetivo de se avaliar a sensibilidade do modelo ao ângulo de atrito do material móvel, às condições de contorno laterais impostas e ao modelo de turbulência adotado na resolução do problema. A simulação 4 é semelhante a simulação 1, sendo as condições de contorno laterais nessa simulação adotadas como condição de simetria. A simulação 5 buscou avaliar a sensibilidade do modelo em relação ao ângulo de atrito do material móvel, com as condições de contorno laterais do tipo parede. A simulação 6, semelhante a simulação 5, além do ângulo de atrito do material móvel, buscou avaliar a sensibilidade as condições de contorno laterais sendo impostas condições do tipo simetria. Já as simulações 7 e 8 foram realizadas com o modelo de turbulência $k - \omega$, sendo na simulação 7 adotada como a condição de contorno nas laterais do modelo a condição do tipo parede e na simulação 8 adotada a condição do tipo simetria. Nas simulações 4, 5 e 6 o erro médio quadrado obtido foi da mesma ordem de grandeza do calculado nas simulações 1, 2 e 3, sendo o RMS obtido igual a 0,0006, mesmo com tempos de simulações diferentes. Já nas simulações 7 e 8, com o modelo de turbulência $k - \omega$, os erros médios quadrados obtidos foram de 0,0008 e 0,0007 respectivamente. De forma semelhante às simulações com fundo fixo, o modelo de turbulência $k - \omega$ apresentou maiores diferenças nos resultados em relação ao modelo $k - \varepsilon$ RNG.

Nas simulações 9, 10, 11 e 12 buscou-se avaliar a sensibilidade do modelo numérico em relação ao diâmetro médio do material granular adotado. Essa análise foi realizada buscando-se reproduzir no modelo uma maior movimentação do fundo móvel, uma vez que nas simulações anteriores o modelo numérico subestimou as erosões e deposições observadas no modelo físico. Para isso, as simulações 9 e 10 foram realizadas se adotando o diâmetro médio do material granular de 1,5 mm e as simulações 11 e 12 foram realizadas com o diâmetro de 8,0 mm.

As simulações para avaliação da sensibilidade do modelo em relação ao ângulo de atrito do material móvel permitem concluir que a adoção do ângulo de atrito de 32° ou do ângulo de atrito de 20° pouco influenciaram no resultado final das mesmas. Já as simulações realizadas para a análise da sensibilidade do modelo quanto as condições de contorno laterais adotadas permitem concluir que, embora as diferenças encontradas na região central do modelo sejam pequenas, as condições de contorno do tipo parede tendem a aumentar a movimentação do fundo

móvel na região dessas fronteiras, isso porque embora essa condição não permita a existência de velocidades normais fronteira, ainda é possível que existam velocidades tangenciais e, conseqüentemente, tensões tangenciais. As análises também permitem concluir que o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG reproduziu com maior fidelidade o fluxo ao longo de toda a estrutura, inclusive na região com fundo móvel, sendo os resultados obtidos com esse modelo de turbulência mais próximos ao modelo físico que os resultados obtidos com o modelo de turbulência $k - \omega$. As avaliações realizadas quanto à sensibilidade do modelo em relação ao diâmetro médio adotado nas simulações indicaram que a adoção de um diâmetro médio da ordem de 10 vezes menor que os utilizados no modelo físico conduziram a uma erosão da mesma ordem de grandeza da observada no modelo físico. Cabe ressaltar que nas simulações com o diâmetro de 1,5 mm a relação entre o diâmetro do material e as dimensões da malha resultou em aproximadamente 27, ou seja, as dimensões da malha são 27 vezes maiores que o diâmetro do material. Essa relação é maior que a relação indicada por Flow Science (2015), igual a 10. Para as simulações 11 e 12, com diâmetro médio de 8 mm essa relação resultou igual a 5. Os resultados obtidos nas simulações 11 e 12 se assemelharam aos resultados obtidos nas simulações anteriores.

Como pode ser observado nos resultados apresentados para as simulações com fundo móvel, as diferenças encontradas em relação ao modelo físico em termos de erosões e deposição, da ordem de -3,7 cm e de 4,7 cm respectivamente correspondem a 2,32 e 2,95 vezes o diâmetro médio do material móvel (igual a 15,9 mm). Embora o material móvel utilizado nas simulações esteja compreendido na faixa de validade dos modelos de transporte de fundo disponíveis no Flow 3D®, uma abordagem a ser estudada futuramente seria a resolução de problemas com fundo móvel envolvendo materiais mais finos, ainda dentro da faixa de validade das equações que o modelo Flow 3D® utiliza na resolução dos problemas.

5 CONSLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo a avaliação da erosão a jusante de bacia de dissipação de vertedouros através de simulação numérica utilizando o software Flow 3D®. Buscou-se através dos objetivos específicos do trabalho avaliar com que precisão o modelo numérico reproduziu os resultados encontrados no modelo físico parcial construído para a avaliação do escoamento do vertedouro da UHE São Salvador.

As análises permitiram concluir que a simulação realizada com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG melhor reproduziu os resultados em termos de pressão e níveis de água observados no modelo físico em comparação a simulação realizada com o modelo de turbulência $k - \omega$, sendo os resultados obtidos com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ RNG bastante aderentes aos resultados obtidos no modelo físico.

As simulações com fundo móvel a jusante da bacia de dissipação do vertedouro foram realizadas com uma malha composta de elementos cúbicos com 4 cm de vértice nessa região, sendo a relação resultante entre o diâmetro médio do material móvel com a dimensão dos elementos da malha de aproximadamente 2,56, menor que a relação indicada por Flow Science (2015), igual a 10. Uma vez respeitada essa relação, os elementos da malha resultariam com vértices de aproximadamente 16 cm. Entretanto, uma malha com essas dimensões não seria capaz de reproduzir de forma satisfatória a hidrodinâmica do problema.

As erosões e deposições observadas nas simulações numéricas podem ser consideradas simétricas, sendo que as condições de contorno laterais utilizadas não tiveram interferência na movimentação dos blocos na região central do modelo. Entretanto, as condições de contorno laterais tiveram interferência nas erosões nos limites laterais do modelo, região das paredes, onde foram observadas maiores profundidades de erosão quando adotada a condição de contorno do tipo 'parede'. Embora no modelo físico os limites laterais sejam paredes de acrílico, as erosões e deposições nessas regiões seguiram a mesma tendência das erosões na região central do modelo. Na modelagem numérica, as simulações com condições de contorno laterais do tipo simetria apresentaram essa mesma tendência.

As simulações realizadas com representação de fundo móvel a jusante da bacia de dissipação do vertedouro apresentaram uma menor movimentação de

material em relação ao que foi observado no modelo físico, sendo as profundidades de erosão e deposição observadas consideravelmente menores que as obtidas no modelo físico. As análises de sensibilidade permitiram concluir que isso se deve provavelmente a relação entre o tamanho dos blocos do material móvel e o tamanho da malha utilizada nessas simulações.

Em casos onde os blocos a serem transportados são de grandes dimensões, a resolução desses problemas através de modelagem numérica se torna difícil, uma vez que a malha deve ser densa o suficiente para a resolução hidrodinâmica do problema ao passo que deve ser maior que 10 vezes o tamanho do diâmetro médio do material a ser transportado.

As análises de sensibilidade realizadas com diâmetros de material móvel menores permitiram concluir que o modelo utilizado possui a capacidade de simular o arraste e deposição do material solto, entretanto, análises futuras devem ser realizadas para a avaliação da precisão do modelo na resolução de problemas com essas características.

Além do mais, as equações de transporte de sedimentos utilizadas foram desenvolvidas com base em observações realizadas em escoamentos que possuíam distribuição logarítmica de velocidades. Os resultados obtidos no modelo numérico em termos de velocidade mostram que a distribuição de velocidades logo a jusante da bacia de dissipação não segue uma distribuição logarítmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHARYA, A. Experimental Study and Numerical Simulation of Flow and Sediment Transport Around a Series of Spur Dikes. Ph.D. Dissertation - University of Arizona, 2011.
- AFZAL, M. S. 3D Numerical Modelling of Sediment Transport under Current and Waves. Master Thesis - Norwegian University of Science and Technology, 2013.
- AL-KHALIF, S. M. Study of open channels degradation and corresponding bed roughness, Phd. Thesis, University of California. 1965
- ALTINBILEK, H.D. OKYAY, S. Localized scour in a horizontal sand bed under vertical jets. IAHR Congress. IAHR, 99-106. 1973
- AHMAD, N. BIHS, H. KAMATH, A. OIVIND, A. A. Three-dimensional CFD modeling of wave scour around side-by-side and triangular arrangement of piles with REEF3D. 8th International Conference on Asian and Pacific Coasts – APAC 2015. 2015.
- ARAÚJO FILHO, M. F. Modelagem Computacional Tridimensional de Escoamentos em Vertedouros de Baixa Queda. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.
- BATES, P. D. LANE, S. N. FERGUSON, R. I. Computational Fluids Dynamics: Applications in Environmental Hydraulics. John Wiley & Sons: Inglaterra, 2005.
- BELLIN, A. FIOROTTO, V. Direct dynamic force measurement on slabs in spillway stilling basins. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. Vol. 121, N° HY 10, pp. 686-693. 1995.
- BETTES, R. Sediment Transport & Alluvial Resistance in Rivers. R&D Technical Report W5i 609. Environment Agency. Bristol, 2008.
- BLAZEK, J. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Elsevier. Oxford, 2001.
- BOLLAERT, E. F. R. LESLEIGHTER, E. J. Spillway rock scour experience and analysis - the Australian scene over the past four decades. 5th International Symposium on Hydraulic Structures. Brisbane, 2014.
- BOLLAERT, E. F. R. Transient water pressures in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact. Ph.D. Dissertation - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – Lausanne, 2002.

BOLLAERT, E. F. R., VRCHOTICKY, B., FALVEY, H.T. Extreme Scour Prediction at High-Head Concrete Dam and Stilling Basin (United States), 3rd Intl. Scour and Erosion Conference, Amsterdam. 2006.

BRETHOUR, J. BURNHAM, J. Modeling Sediment Erosion and Deposition with the FLOW-3D Sedimentation & Scour Model. Technical note FSI-09-TN-85, Flow Science. Santa Fe, 2010.

BROOKS, N. H. Discussion of boundary shear stresses in curved trapezoidal channels by A. T. Ippen and P. A. Drinker. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, v. 89, n. 3, p. 327 – 333. 1963

BRORS, B. Numerical Modeling of Flow and Scour at Pipelines. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 511 -523. 1999.

CARVALHO, E. O Vertedouro de Marimbondo – Desempenho e Reparos da Bacia de Dissipação. Grandes Vertedouros Brasileiros. Comitê Brasileiro de Barragens, 2010.

CARVALHO, N. O. Hidrossedimentologia Prática. 2ª Edição. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2008.

CATAKLI, O. OZAL, K. TANDOĞAN, A. R. A Study of Scours at the End of Stilling Basin and use of Horizontal Beams as Energy Dissipators. 11th Congress of Large Dams, Madrid. 1973.

CEHPAR. Projeto HL-120a – Estudos Hidráulicos em Modelo Reduzido do Vertedouro da UHE São Salvador – Relatório nº 01. Curitiba, 2002.

CHANSON, H. The Hydraulics of Open Channel Flow. 2ª Edição. Editora Arnold. Londres, 1999.

CHAUVIN, G. E. DE CESARE, G. SCHWINDT, S. Numerical Modelling of Plunge Pool Scour Evolution in Non-Cohesive Sediments. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics Vol. 8, No. 4, p. 477-487, 2014.

DALMORA, C. T. Construção de Ensecadeiras em água Corrente Estudo de Estabilidade de Material Lançado em Ponta de Aterro. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2016.

DU BOYS, D. Le Rhône et les rivières à lit affouillable. Annales des Ponts et Chaussées, Serie 5, Volume 18. 1879.

EINSTEIN, H. A. The bed load function for sediment transportation in open channel flows. Technical Bulletin nº 1026, U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington D. C. 1950.

EINSTEIN, H. A. CHIEN, N. Second approximation to the solution of the suspended load theory. Research Report N° 3, Universidade da Califórnia. Berkeley. Estados Unidos da América. 1954.

EGGENBERGER, W. Die kolkbildung bei einen uberstromen und beider kombination uberstromen-unterstromen. Ph.D. thesis, ETH, Zurich, Switzerland. 1943.

FIOROTTO, V. SALANDIN, P. Design of anchored slabs in spillway stilling basins. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. Vol. 126. N° 7. pp 502-512. 2000.

FIOROTTO, V. RINALDO, A. Fluctuating uplift and lining design in spillway stilling basins. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. Vol. 118, HY4. 1992.

FLOW SCIENCE. FLOW 3D® v11.1 User manual. 2015.

GILL M. A. Diffusion model for aggrading channels. Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.21, No. 5, pp. 355-367. 1983

HENDERSON, F. M. Open Channel Flow. MacMillan. New York, 1966.

INFANTI JR., N. BRITO, S. N. A. Erosão de Maciços Rochosos a Jusante de Vertedouros. Grandes Vertedouros Brasileiros. Comitê Brasileiro de Barragens. 2010.

JAEGER, C. Über die aehnlichkeit bei flussaulichen modellversuchen. Wasserkraft Wasserwirtsch., 34(23/24), 269. 1939

JOHNSON, M.; SAVAGE, B. Physical and Numerical Comparison of Flow over Ogee Spillway in the Presence of Tailwater. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 132, n. 12, p. 1353-1357. 2006.

JIA, Y. WANG, S. S. Y. Numerical model for channel flow and morphological change studies. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, v. 125, n. 9, p. 737 – 749. 1999.

JIA, Y. KITAMURA, T. WANG, S. S. Y. Simulation of scour process in plunging pool of loose bed-material. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, v. 127, n. 3, p. 219 - 229. 2001.

LANE, E. W. KALINSKE, A. A. Engineering calculations of suspended sediment. Transactions, American Geophysical Union. 1941.

LAURSEN, E. M. Predicting scour at bridge piers and abutments. General Report N° 3, Arizona Department of Transportation. Phoenix, Arizona. 1980.

LYN, D. Turbulence Models for Sediment Transport Engineering. Sedimentation Engineering: pp. 763-825. ASCE. Reston, 2008.

MANZO, P. The influence of pool geometry and induced flow patterns in rock scour by high-velocity plunging jets. Laboratoire de Constructions Hydrauliques - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – Lausanne, 2006.

MASTBERGEN, D. R. VAN DER BERG, J. H. Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons. Sedimentology. Nova Jersey. 2003

MEYER-PETER, E., MÜLLER, R. Formulas of Bed Load Transport. Zweite Tagung – Second Meeting – Deuxieme Reunion. Estocolmo, 1948.

MEHNIFARD, M. A., DALFARDI, S., BAGHDADI, H., SEIRFAR, Z. Simulation of Local Scour Caused by Submerged Horizontal Jets with Flow-3D Numerical Model. International Desert Research Center (IDRC), University of Tehran. Iran. 2014.

MORRIS, G. L., FAN, J. Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use. Editora McGraw-Hill. Porto Rico, 1997.

MONTGOMERY, R.A. Investigations into rock erosion by high velocity water flows. Hydraulics Laboratory Stockholm. Estocolmo, 1984.

NEIDERT, S. H. Desempenho de Vertedores – Dissipação de Energia. Cavitação e Erosão. Publicação nº 37. CEHPAR. Curitiba, 1980.

NIELSEN, P. Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport, World Scientific. 1992.

NOVAK, P. Influence of Bed Load Passage on Scour and Turbulence Downstream of a Stilling Basin. 9th Congress of the I.A.H.R., Dubrovnik. 1961.

OLSEN, N. R. B. MELAAEN, M. C. Three Dimensional Calculation of Scour around Cylinders. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, v. 119, n. 9, p. 1048 - 1054. 1993.

PEREIRA, G. M., VASCONCELOS, A. A. Tratamento do Descarregador de Fundo da UHE Sobradinho. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens - Foz Do Iguaçu, 2015.

PINTO JR., A. J. N. Desenvolvimento de um Modelo Físico para Simulação de Processos de Erosão a Jusante de Estruturas de Vertedouros. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

PRANDTL, L. Über die ausgebildete Turbulenz. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1925.

REINIUS, E. Rock Erosion. Water Power and Dam Construction. pp. 43-48. 1986.

SCAPIN, J. PAIVA, J. B. D. BELING, F. A. Avaliação de Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em um Pequeno Rio Urbano – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 12 n. 4. 2007.

SCHOKLITSCH, A. Berechnung der Kolkiefen flussabwärts eines Stauwerkes. Wasser- und Energiewirtschaft Nr 2. 1951.

SENTURK, F. Hydraulics of Dams and Reservoirs. Highlands Ranch: Water Resources Publication. 1994.

STEVENS, M. A. SIMONS, D. B. Stability analysis of coarse granular material on slopes. River Mechanics, H. W. Shen, ed/publisher, Fort Collins. Colo. 1971.

SHIELDS, A. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und turbulenz forschung auf die geschiebebewegung. Mitteil Preuss, Versuchsanst Wasser and Schiffsbau, Berlim. 1936.

SINGH, V. Two Dimensional Sediment Transport Model Using Parallel Computers. Master Thesis - Louisiana State University. Louisiana, 2005.

SOBRINHO, J. A., INFANTI JR, N. Erosion of Rock Masses Subject to Flow Action: Some Geomechanical and Hydraulic Aspects. V International Congress of Engineering Geology. Buenos Aires, 1986.

SOULSBY, R. Dynamics of Marine Sand. Chapter 9: Bedload Transport. Thomas Telford Publications. Londres. 1997.

SPASOJEVIC, M. HOLLY, F. M. JR. Three Dimensional Numerical Simulation of Mobile-Bed Hydrodynamics. Technical Report n 367, Iowa Institute of Hydraulic Research. Universidade de Iowa. Iowa. 1993.

SPASOJEVIC, M. HOLLY, F. Two- and Three-Dimensional Numerical Simulation of Mobile-Bed Hydrodynamics and Sedimentation. Sedimentation Engineering: pp. 683-761. ASCE. Reston, 2008.

SPASOJEVIC, M. MUSTE, M. Numerical model study of Berwick Harbor, Morgan City, Louisiana. Technical Report n. 422, Iowa Institute of Hydraulic Research. Universidade de Iowa. Iowa. 2002.

THOMAS, W. CHANG, H. Computational Modeling of Sedimentation Processes. Sedimentation Engineering: pp. 649-681. ASCE. Reston, 2008.

TINNEY, E. R. A study of the mechanics of degradation of a bed of uniform sediment in an open channel, Phd. Thesis, University of Minnesota. 1955.

TRACTEBEL. UHE São Salvador. Disponível em <<http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/parque-gerador/usinas-hidreletricas>>. Acesso em: 21 set 2016.

TULIMILLI, B. R. Three-Dimensional Scouring Analysis for Open Channel Pressure Flow Scour Under Flooded Bridge Decks. International Mechanical Engineering Congress & Exposition. Denver, 2011.

TULIMILLI, B.R. Development of Generalized 3D scouring Methodology for Implementation in a CFD Code. Master Thesis - Northern Illinois University. Illinois, 2010.

VANONI, V. A. Measurements of Critical Shear Stress for Entraining Fine Sediments in a Boundary Layer. Final Report to U. S. Public Health Service Research Grant RG – 6915. W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources Division of Engineering and Applied Science - California Institute of Technology. Pasadena, California. 1964.

VAN RIJN, L. Sediment transport, Part I: Bed Load Transport. Journal of Hydraulic Engineering, 110(10):1431–1456, 1984.

VAN RIJN, L. Mathematical Modelling of Morphological Processes in the Case of Suspended Sediment Transport. Delft Hydraulic Communication n 382. Delft Hydraulics. Holanda. 1987.

WEI, G. BRETHOUR, J., GRÜNZNER, M., BURNHAM, J. The Sedimentation Scour Model in FLOW-3D. Flow Science Report 03-14. Santa Fe, Novo México, 2014.

WHITTAKER, J. G. SCHLEISS, A. Scour Related to Energy Dissipators for High Head Stuctures. Mitteilungen der Versuchsanstalt fur Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie – Nr 73 – Zurich. 1984.

WU, W. Computational River Dynamics. Taylor & Francis. Holanda, 2008.

XIE, Z. Theoretical and Numerical Research on Sediment Transport in Pressurized Flow Conditions. Ph.D. Dissertation - University of Nebraska. Lincoln, 2011.

ZAGHLOUL, N. A. McCORQUODALE, J. A. A stable numerical model for local scour. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, v. 13, n. 4, p. 425 - 444. 1975.

ZHANG, H. KAHAWITA, R. Nonlinear model for aggradation in alluvial channels. Journal Hydraulics Engineering. ASCE, 113(3), 353-369. 1987.

YAKHOT, V. ORSZAG, S. A. Renormalization group analysis of turbulence 1: Basic theory. *Journal of Scientific Computing*. 1986.

APÊNDICE 1 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM CONSIDERAÇÃO DE FUNDO FIXO

TABELA 21 – PRESSÕES AO LONGO DA CRISTA DO VERTEDOURO E DA BACIA DE
DISSIPACÃO – DIFERENÇAS MÁXIMAS E ERRO MÉDIO QUADRÁTICO – MODELO DE
TURBULÊNCIA $k - \varepsilon$ RNG

Tomada de Pressão nº	Abcissa X (m)	Cota (m)	Modelo Físico		Simulado – Flow 3D		Diferença (%)		RMS
			Cota Piezométrica (m)	Pressão (mca)	Cota Piezométrica (m)	Pressão (mca)	Cota Piezométrica	Pressão	Quadrado do Erro
1	3,447	1,926	2,260	0,333	2,258	0,332	-0,001	-0,004	0,0000
2	3,487	1,945	2,205	0,260	2,207	0,263	0,001	0,010	0,0000
3	3,507	1,949	2,159	0,210	2,166	0,217	0,003	0,033	0,0000
4	3,527	1,950	2,117	0,167	2,130	0,180	0,006	0,081	0,0002
5	3,547	1,949	2,083	0,134	2,086	0,138	0,002	0,027	0,0000
6	3,567	1,946	2,042	0,096	2,048	0,102	0,003	0,061	0,0000
7	3,597	1,938	1,984	0,046	2,000	0,062	0,008	0,358	0,0003
8	3,627	1,928	1,940	0,012	1,953	0,025	0,007	1,077	0,0002
9	3,667	1,910	1,913	0,003	1,912	0,002	0,000	-0,253	0,0000
10	3,727	1,874	1,906	0,032	1,859	-0,015	-0,024	-1,462	0,0021
11	3,807	1,813	1,990	0,177	1,928	0,116	-0,031	-0,347	0,0038
12	3,897	1,749	2,076	0,327	2,045	0,296	-0,015	-0,095	0,0010
13	3,977	1,717	2,083	0,366	2,066	0,350	-0,008	-0,044	0,0003
14	4,057	1,702	2,062	0,360	2,038	0,336	-0,012	-0,066	0,0006
15	4,137	1,700	1,998	0,298	1,980	0,280	-0,009	-0,058	0,0003
16	4,177	1,700	1,984	0,284	1,967	0,267	-0,008	-0,058	0,0003
17	4,217	1,700	1,979	0,279	1,963	0,263	-0,008	-0,057	0,0003
18	4,257	1,700	1,979	0,279	1,962	0,262	-0,009	-0,061	0,0003
19	4,297	1,700	1,974	0,274	1,962	0,262	-0,006	-0,042	0,0001
20	4,337	1,700	1,979	0,279	1,964	0,264	-0,008	-0,054	0,0002
21	4,377	1,700	1,979	0,279	1,966	0,266	-0,006	-0,045	0,0002
22	4,457	1,700	1,985	0,285	1,972	0,272	-0,006	-0,044	0,0002
23	4,537	1,700	1,991	0,291	1,979	0,279	-0,006	-0,041	0,0001
24	4,617	1,700	1,999	0,299	1,986	0,286	-0,006	-0,043	0,0002
25	4,817	1,700	2,045	0,345	2,024	0,324	-0,010	-0,060	0,0004
26	5,066	1,792	1,936	0,144	1,925	0,133	-0,005	-0,073	0,0001
RMS Calculado:									0,0004

FONTE: O autor (2017)

TABELA 22 – PERFIL DA LINHA DE ÁGUA AO LONGO DO VERTEDOURO – DIFERENÇAS MÁXIMAS E ERRO MÉDIO QUADRÁTICO - $k - \varepsilon$ RNG

Ponto de Medição	Abcissa X (m)	Cota da Tomada (m)	Nível de água (m)			RMS
			Modelo Físico	Simulado Flow 3D	Diferença	Quadrado do Erro
1	3,5774	1,9433	2,0637	2,0812	-0,0175	0,0003
2	3,6274	1,9275	2,0297	2,0453	-0,0156	0,0002
3	3,7274	1,8740	1,9697	1,9813	-0,0116	0,0001
4	3,7924	1,7955	1,9363	1,9396	-0,0033	0,0000
5	3,8274	1,7960	1,9447	1,9203	0,0243	0,0006
6	3,9274	1,7343	1,9497	1,9174	0,0323	0,0010
7	4,0274	1,7052	1,9597	1,9358	0,0238	0,0006
8	4,1274	1,7000	1,9647	1,9461	0,0186	0,0003
9	4,2274	1,7000	1,9697	1,9554	0,0142	0,0002
10	4,3274	1,7000	1,9797	1,9658	0,0139	0,0002
11	4,5274	1,7000	2,0047	1,9862	0,0185	0,0003
12	4,8274	1,7000	2,0347	2,0146	0,0201	0,0004
13	5,0274	1,7917	2,0497	2,0381	0,0116	0,0001
RMS Calculado						0,0003

FONTE: O autor (2017)

TABELA 23 – PRESSÕES AO LONGO DA CRISTA DO VERTEDOURO E DA BACIA DE DISSIPAÇÃO – DIFERENÇAS MÁXIMAS E ERRO MÉDIO QUADRÁTICO – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$

Tomada de Pressão nº	Abcissa X (m)	Cota (m)	Modelo Físico		Simulado - Flow3D		Diferença (%)		RMS
			Cota Piezométrica (m)	Pressão (mca)	Cota Piezométrica (m)	Pressão (mca)	Cota Piezométrica	Pressão	Quadrado do Erro
1	3,447	1,926	2,260	0,333	2,257	0,331	-0,0011	-0,007	0,0000
2	3,487	1,945	2,205	0,260	2,198	0,254	-0,0030	-0,025	0,0000
3	3,507	1,949	2,159	0,210	2,161	0,212	0,0010	0,011	0,0000
4	3,527	1,950	2,117	0,167	2,128	0,178	0,0056	0,071	0,0001
5	3,547	1,949	2,083	0,134	2,088	0,140	0,0027	0,042	0,0000
6	3,567	1,946	2,042	0,096	2,051	0,106	0,0048	0,102	0,0001
7	3,597	1,938	1,984	0,046	2,008	0,070	0,0122	0,529	0,0006
8	3,627	1,928	1,940	0,012	1,957	0,030	0,0090	1,438	0,0003
9	3,667	1,910	1,913	0,003	1,908	-0,002	-0,0025	-1,504	0,0000
10	3,727	1,874	1,906	0,032	1,853	-0,021	-0,0276	-1,662	0,0028
11	3,807	1,813	1,990	0,177	1,913	0,100	-0,0386	-0,434	0,0059
12	3,897	1,749	2,076	0,327	2,016	0,267	-0,0289	-0,184	0,0036
13	3,977	1,717	2,083	0,366	2,052	0,336	-0,0147	-0,084	0,0009
14	4,057	1,702	2,062	0,360	2,009	0,307	-0,0257	-0,147	0,0028
15	4,137	1,700	1,998	0,298	1,939	0,239	-0,0294	-0,197	0,0034
16	4,177	1,700	1,984	0,284	1,920	0,220	-0,0320	-0,224	0,0040
17	4,217	1,700	1,979	0,279	1,913	0,213	-0,0331	-0,235	0,0043
18	4,257	1,700	1,979	0,279	1,911	0,211	-0,0344	-0,244	0,0046
19	4,297	1,700	1,974	0,274	1,911	0,211	-0,0320	-0,231	0,0040

Tomada de Pressão nº	Abcissa X (m)	Cota (m)	Modelo Físico		Simulado - Flow3D		Diferença (%)		RMS
			Cota Piezométrica (m)	Pressão (mca)	Cota Piezométrica (m)	Pressão (mca)	Cota Piezométrica	Pressão	Quadrado do Erro
20	4,337	1,700	1,979	0,279	1,912	0,212	-0,0338	-0,240	0,0045
21	4,377	1,700	1,979	0,279	1,914	0,214	-0,0329	-0,234	0,0042
22	4,457	1,700	1,985	0,285	1,918	0,218	-0,0337	-0,235	0,0045
23	4,537	1,700	1,991	0,291	1,921	0,221	-0,0349	-0,239	0,0048
24	4,617	1,700	1,999	0,299	1,924	0,224	-0,0374	-0,250	0,0056
25	4,817	1,700	2,045	0,345	1,972	0,272	-0,0357	-0,212	0,0053
26	5,066	1,792	1,936	0,144	1,788	-0,004	-0,0762	-1,024	0,0218
RMS Calculado:									0,0034

FONTE: O autor (2017)

TABELA 24 – PERFIL DA LINHA DE ÁGUA AO LONGO DO VERTEDOURO – DIFERENÇAS MÁXIMAS E ERRO MÉDIO QUADRÁTICO – $k - \omega$

Ponto de Medição	Abcissa X (m)	Cota da Tomada (m)	Nível de água (m)			RMS
			Modelo Físico	Simulado Flow 3D	Diferença	Quadrado do Erro
1	3,5774	1,9433	2,0637	2,0721	-0,0084	0,0001
2	3,6274	1,9275	2,0297	2,0431	-0,0134	0,0002
3	3,7274	1,8740	1,9697	1,9813	-0,0116	0,0001
4	3,7924	1,8300	1,9363	1,9414	-0,0050	0,0000
5	3,8274	1,7960	1,9447	1,9201	0,0246	0,0006
6	3,9274	1,7343	1,9497	1,9001	0,0495	0,0025
7	4,0274	1,7052	1,9597	1,9034	0,0563	0,0032
8	4,1274	1,7000	1,9647	1,9024	0,0623	0,0039
9	4,2274	1,7000	1,9697	1,9069	0,0628	0,0039
10	4,3274	1,7000	1,9797	1,9146	0,0651	0,0042
11	4,5274	1,7000	2,0047	1,9297	0,0750	0,0056
12	4,8274	1,7000	2,0347	1,9380	0,0967	0,0093
13	5,0274	1,7917	2,0497	1,9953	0,0543	0,0030
RMS Calculado						0,0028

FONTE: O autor (2017)

APÊNDICE 2 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM CONSIDERAÇÃO DE FUNDO MÓVEL E DURAÇÃO DE 50 MINUTOS

TABELA 25 – CORTE LONGITUDINAL NO VÃO CENTRAL DO VERTEDOURO - RESULTADOS
DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E MODELO FÍSICO COM FUNDO MÓVEL

Ponto	X	Elevação Inicial (m)	Modelo Físico (m)	Simulação 1		Simulação 2		Simulação 3	
				Elevação (m)	Quadrado do Erro	Elevação (m)	Quadrado do Erro	Elevação (m)	Quadrado do Erro
1	5,100	1,7750	1,7767	1,7692	0,0001	1,7692	0,0001	1,7692	0,0001
2	5,187	1,7750	1,7643	1,7718	0,0001	1,7712	0,0000	1,7710	0,0000
3	5,297	1,7750	1,7553	1,7753	0,0004	1,7763	0,0004	1,7764	0,0004
4	5,397	1,7750	1,7523	1,7750	0,0005	1,7751	0,0005	1,7753	0,0005
5	5,497	1,7750	1,7333	1,7750	0,0017	1,7750	0,0017	1,7751	0,0017
6	5,597	1,7750	1,7383	1,7750	0,0013	1,7750	0,0013	1,7750	0,0013
7	5,697	1,7750	1,7673	1,7750	0,0001	1,7750	0,0001	1,7750	0,0001
8	5,797	1,7750	1,7963	1,7750	0,0005	1,7750	0,0005	1,7750	0,0005
9	5,897	1,7928	1,8308	1,7928	0,0014	1,7928	0,0014	1,7928	0,0014
10	5,997	1,8083	1,8433	1,8168	0,0007	1,8172	0,0007	1,8182	0,0006
11	6,097	1,8083	1,8553	1,8083	0,0022	1,8083	0,0022	1,8073	0,0023
12	6,197	1,8083	1,8343	1,8083	0,0007	1,8083	0,0007	1,8083	0,0007
13	6,287	1,8083	1,8143	1,8083	0,0000	1,8083	0,0000	1,8083	0,0000
14	6,397	1,8083	1,8073	1,8083	0,0000	1,8083	0,0000	1,8083	0,0000
15	6,497	1,8083	1,8113	1,8083	0,0000	1,8083	0,0000	1,8083	0,0000
16	6,597	1,8083	1,8123	1,8083	0,0000	1,8083	0,0000	1,8083	0,0000
17	6,697	1,8083	1,8093	1,8083	0,0000	1,8083	0,0000	1,8083	0,0000
RMS					0,0006		0,0006		0,0006

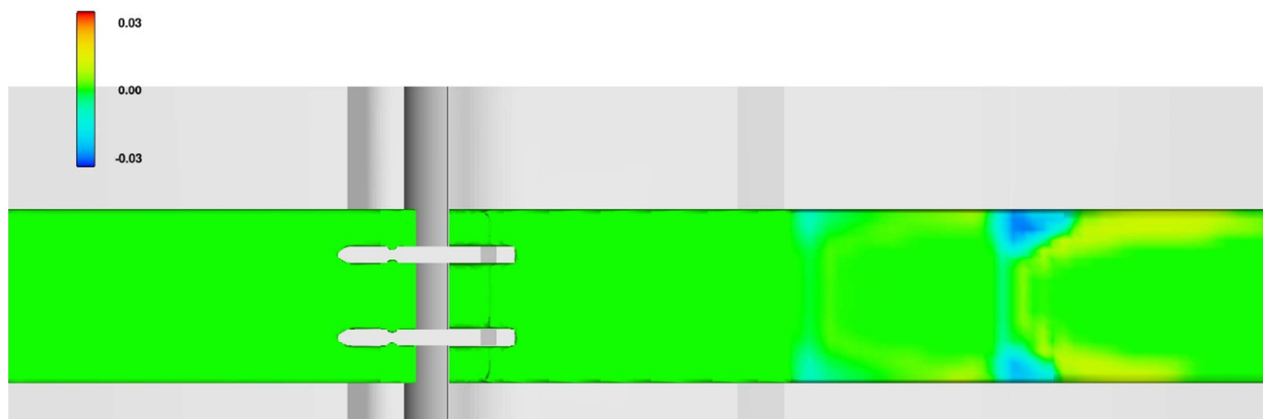
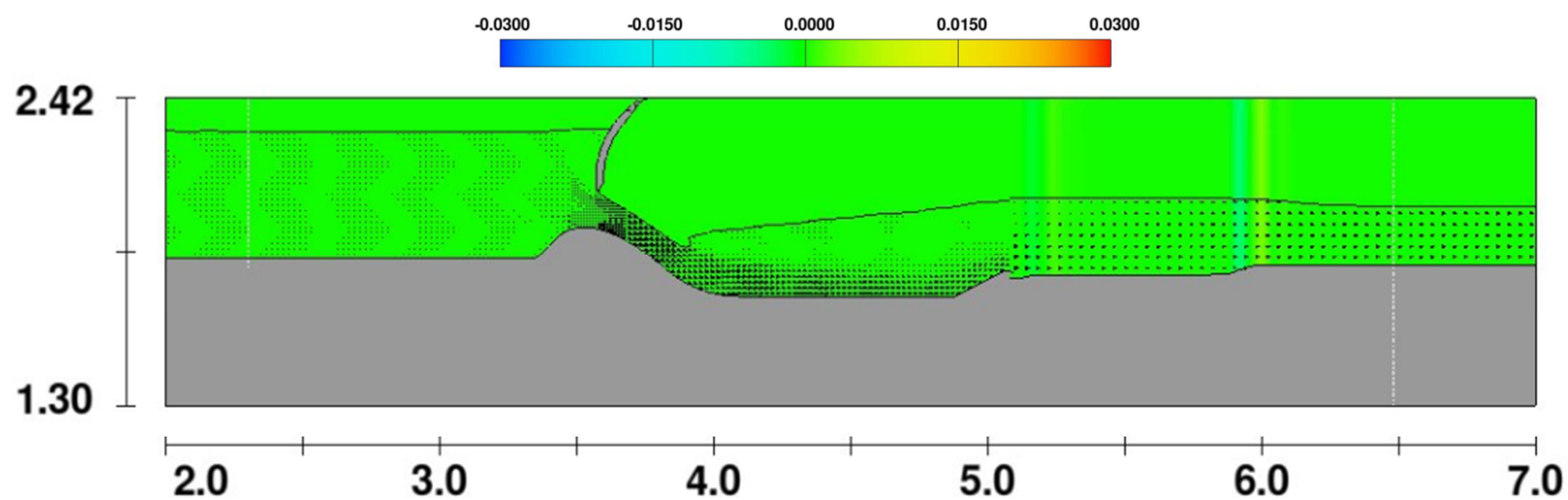
FIGURA 53 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 8$ - PLANTAFIGURA 54 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 8$ – CORTE NO CENTRO DO VÃO

FIGURA 55 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 8$ – CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA

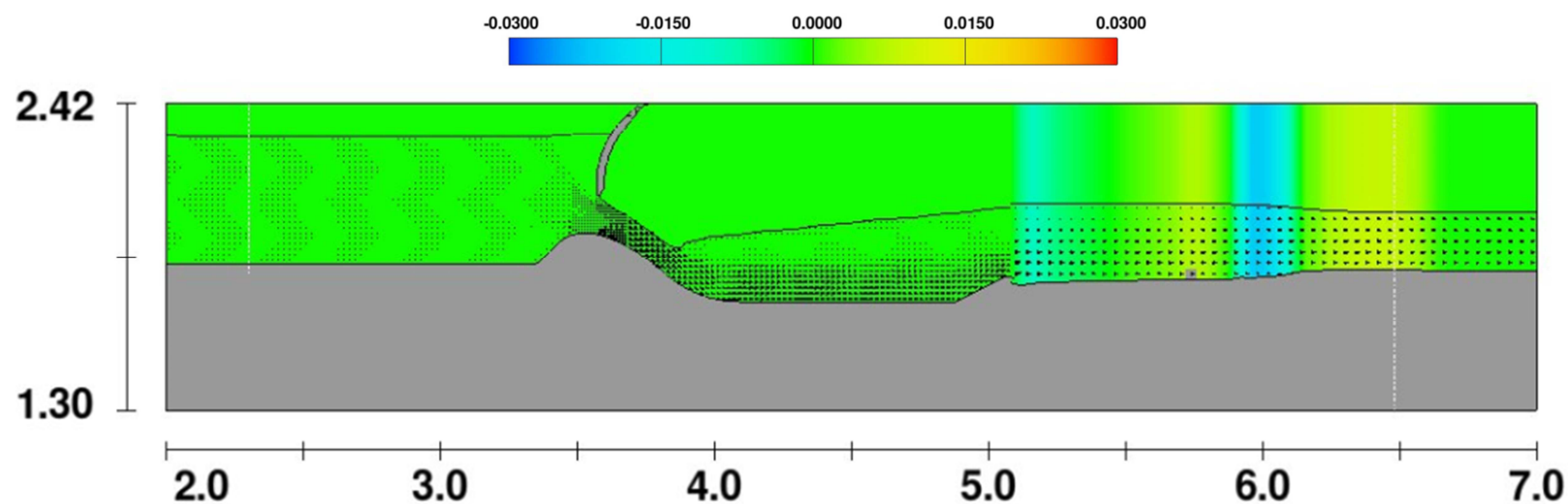


FIGURA 56 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 8$ – CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA

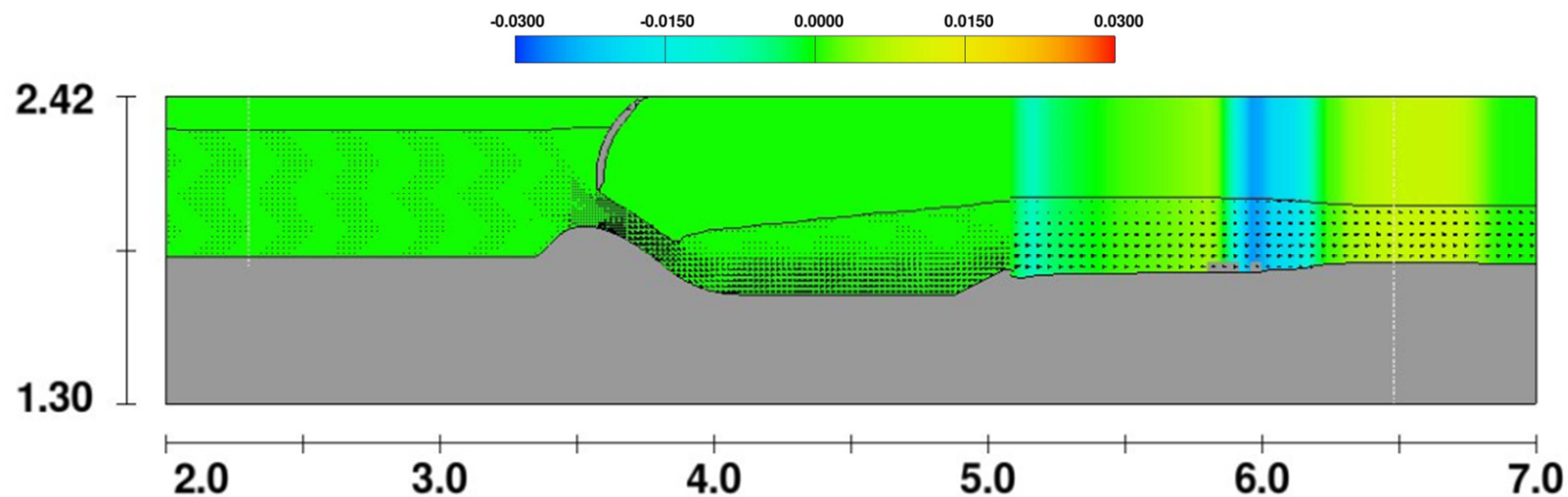


FIGURA 57 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 13$ - PLANTA

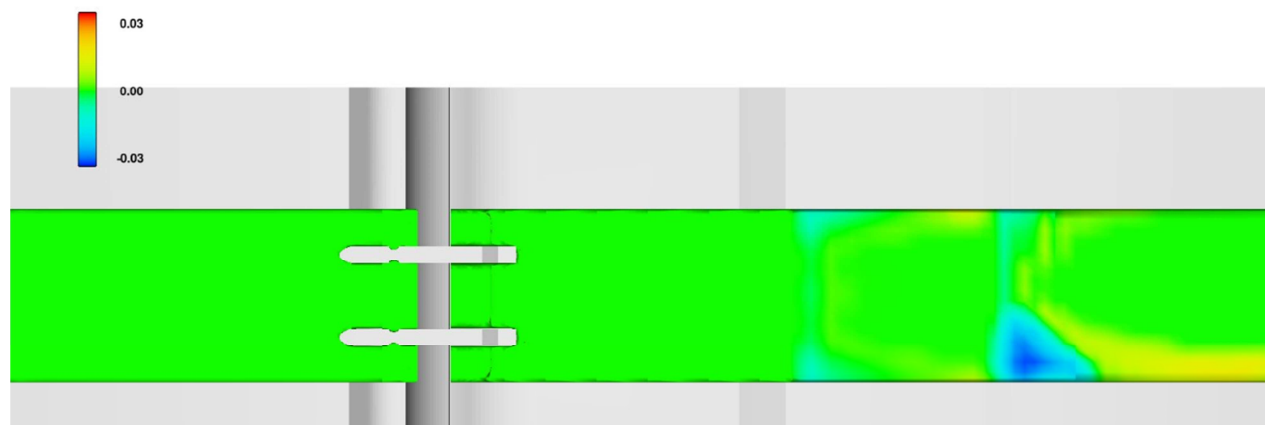


FIGURA 58 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 13$ – CORTE NO CENTRO DO VÃO

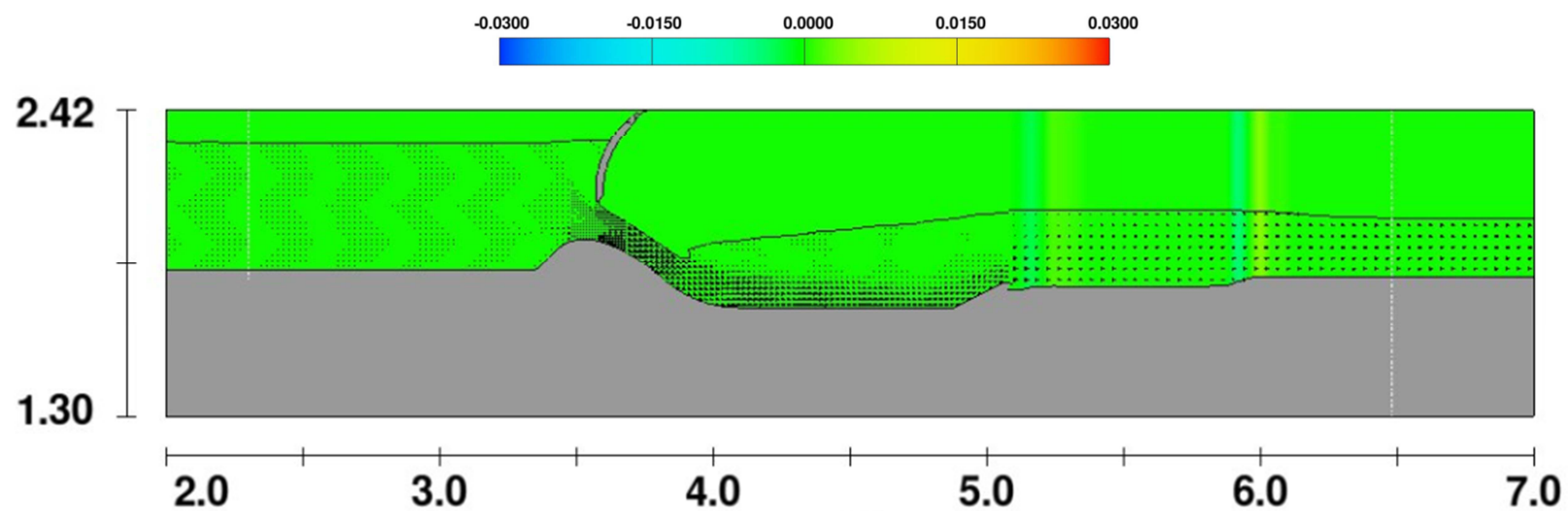


FIGURA 59 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 13$ – CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA

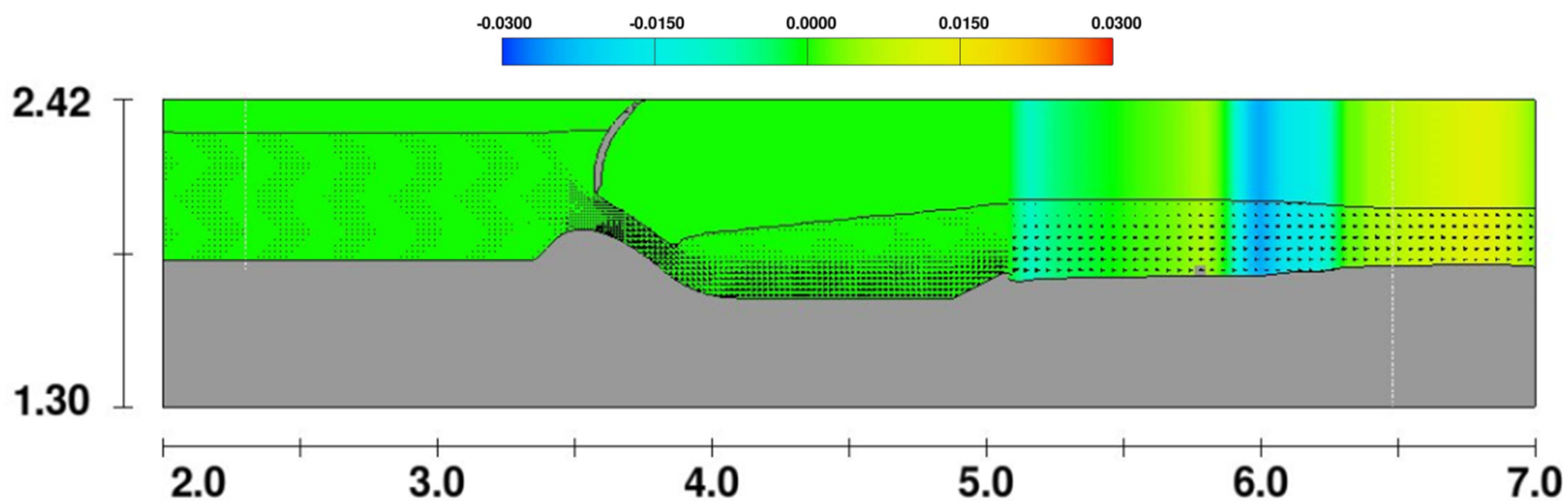


FIGURA 60 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 13$ – CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA

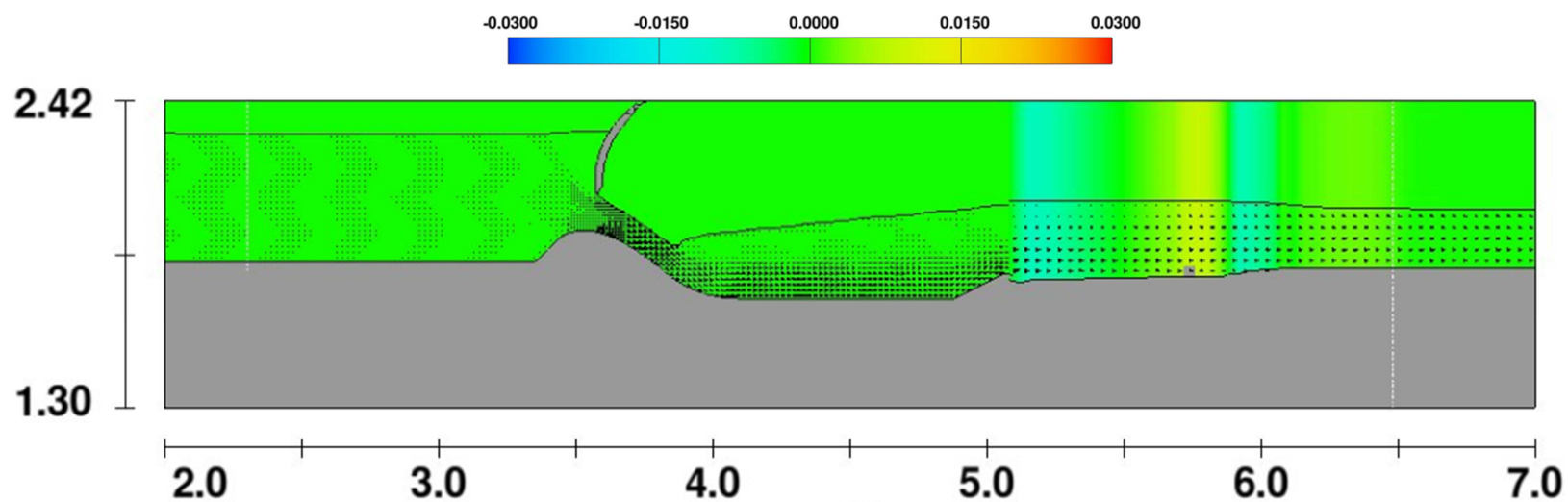


FIGURA 61 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN - PLANTA

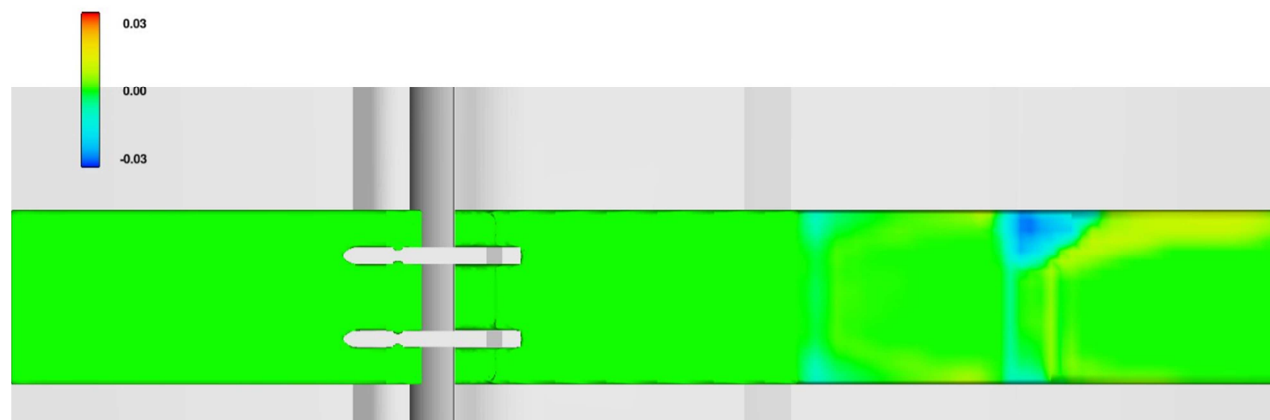


FIGURA 62 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN – CORTE NO CENTRO DO VÃO

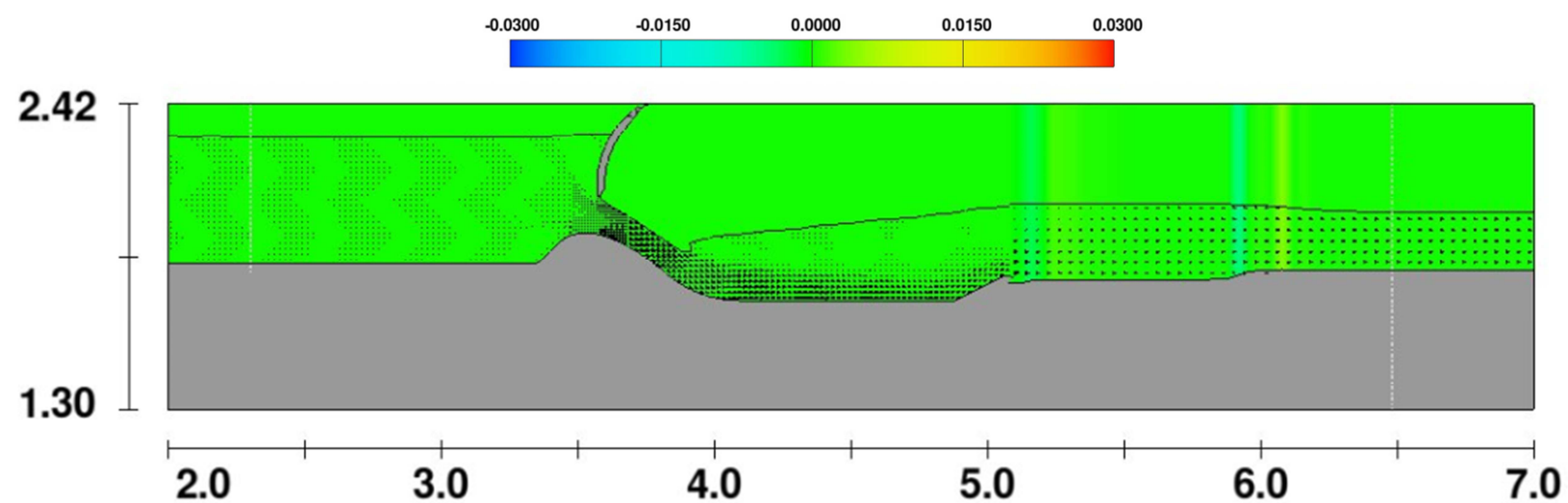


FIGURA 63 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN – CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA

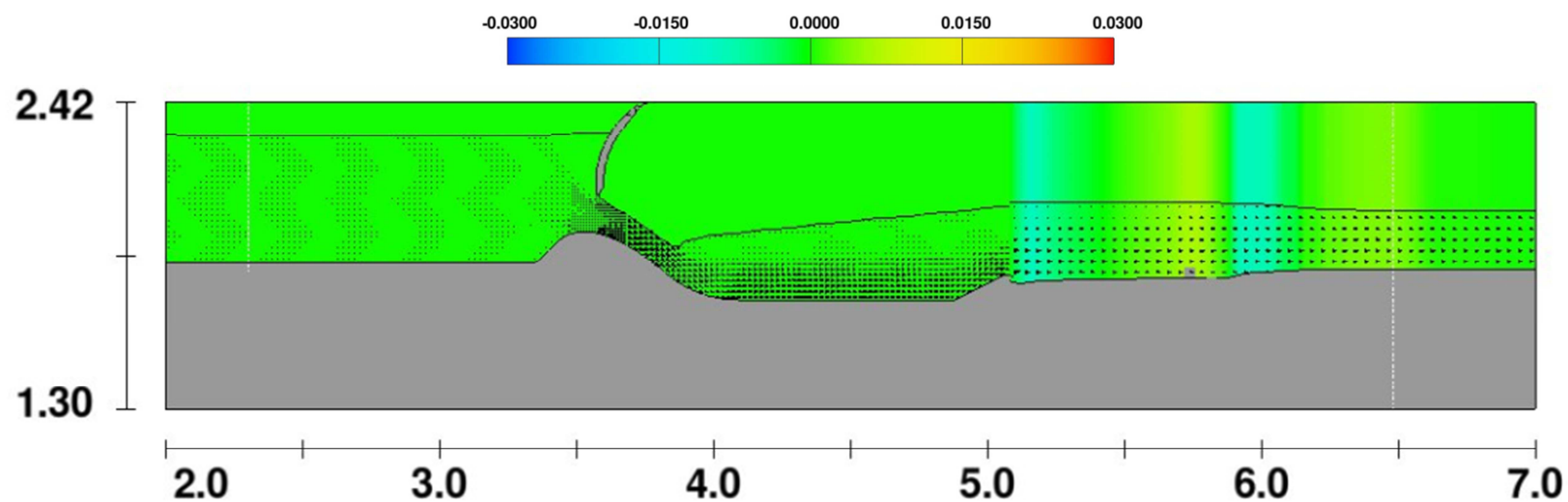
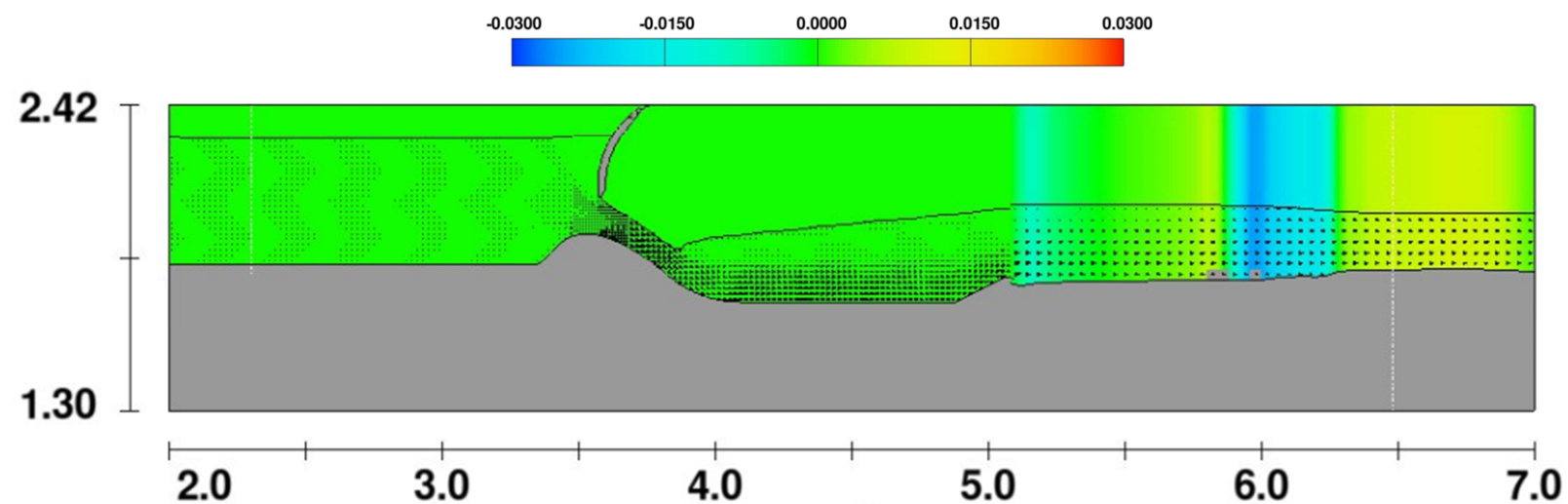


FIGURA 64 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN – CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA



**APÊNDICE 3 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA ANÁLISES DE
SENSIBILIDADE DO MODELO COM CONSIDERAÇÃO DE FUNDO MÓVEL E
DURAÇÃO DE 10 MINUTOS**

TABELA 26 – CORTE LONGITUDINAL NO VÃO CENTRAL DO VERTEDOURO - RESULTADOS
DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E MODELO FÍSICO COM FUNDO MÓVEL – ANÁLISES DE
SENSIBILIDADE

X (m)	Elevação Inicial (m)	Modelo Físico (m)	Elevação do Fundo (m)				
			Simulação 4	Simulação 5	Simulação 6	Simulação 7	Simulação 8
5,100	1,7750	1,7767	1,7692	1,7692	1,7692	1,7695	1,7695
5,187	1,7750	1,7643	1,7710	1,7726	1,7703	1,7630	1,7626
5,297	1,7750	1,7553	1,7772	1,7757	1,7769	1,7669	1,7667
5,397	1,7750	1,7523	1,7752	1,7750	1,7760	1,7701	1,7703
5,497	1,7750	1,7333	1,7750	1,7750	1,7750	1,7735	1,7735
5,597	1,7750	1,7383	1,7750	1,7750	1,7750	1,7753	1,7754
5,697	1,7750	1,7673	1,7750	1,7750	1,7750	1,7786	1,7795
5,797	1,7750	1,7963	1,7750	1,7750	1,7750	1,7823	1,7823
5,897	1,7928	1,8308	1,7928	1,7928	1,7928	1,7848	1,7879
5,997	1,8083	1,8433	1,8164	1,8139	1,8155	1,7874	1,7920
6,097	1,8083	1,8553	1,8067	1,8083	1,8067	1,7921	1,7980
6,197	1,8083	1,8343	1,8084	1,8083	1,8083	1,7988	1,8024
6,287	1,8083	1,8143	1,8083	1,8083	1,8083	1,8151	1,8126
6,397	1,8083	1,8073	1,8083	1,8083	1,8083	1,8137	1,8149
6,497	1,8083	1,8113	1,8083	1,8083	1,8083	1,8142	1,8151
6,597	1,8083	1,8123	1,8083	1,8083	1,8083	1,8147	1,8144
6,697	1,8083	1,8093	1,8083	1,8083	1,8083	1,8147	1,8134
RMS			0,0006	0,0006	0,0006	0,0008	0,0007

X (m)	Elevação Inicial (m)	Modelo Físico (m)	Elevação do Fundo (m)			
			Simulação 9	Simulação 10	Simulação 11	Simulação 12
5,100	1,7750	1,7767	1,7695	1,7695	1,7691	1,7692
5,187	1,7750	1,7643	1,7667	1,7667	1,7667	1,7667
5,297	1,7750	1,7553	1,7404	1,7461	1,7696	1,7697
5,397	1,7750	1,7523	1,7382	1,7420	1,7719	1,7719
5,497	1,7750	1,7333	1,7332	1,7403	1,7746	1,7745
5,597	1,7750	1,7383	1,7339	1,7405	1,7761	1,7760
5,697	1,7750	1,7673	1,7365	1,7416	1,7787	1,7795
5,797	1,7750	1,7963	1,7382	1,7423	1,7832	1,7871
5,897	1,7928	1,8308	1,7396	1,7434	1,7836	1,7892
5,997	1,8083	1,8433	1,7409	1,7442	1,7860	1,8118
6,097	1,8083	1,8553	1,7445	1,7455	1,7893	1,8067
6,197	1,8083	1,8343	1,7467	1,7464	1,7978	1,8067

X (m)	Elevação Inicial (m)	Modelo Físico (m)	Elevação do Fundo (m)			
			Simulação 9	Simulação 10	Simulação 11	Simulação 12
6,287	1,8083	1,8143	1,7495	1,7479	1,8141	1,8067
6,397	1,8083	1,8073	1,7513	1,7495	1,8148	1,8067
6,497	1,8083	1,8113	1,7545	1,7550	1,8053	1,8067
6,597	1,8083	1,8123	1,7586	1,7667	1,8070	1,8067
6,697	1,8083	1,8093	1,7667	1,7796	1,8085	1,8067
RMS			0,0035	0,0032	0,0009	0,0006

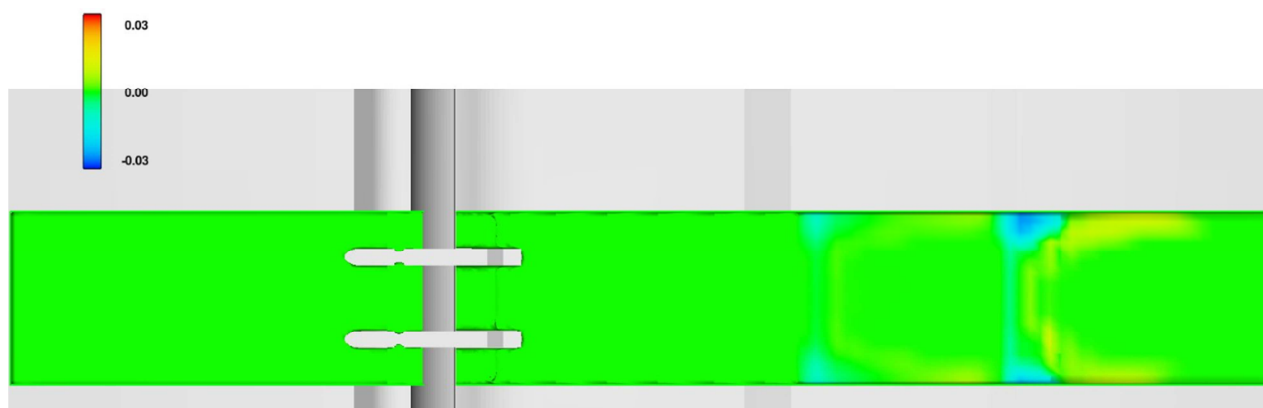
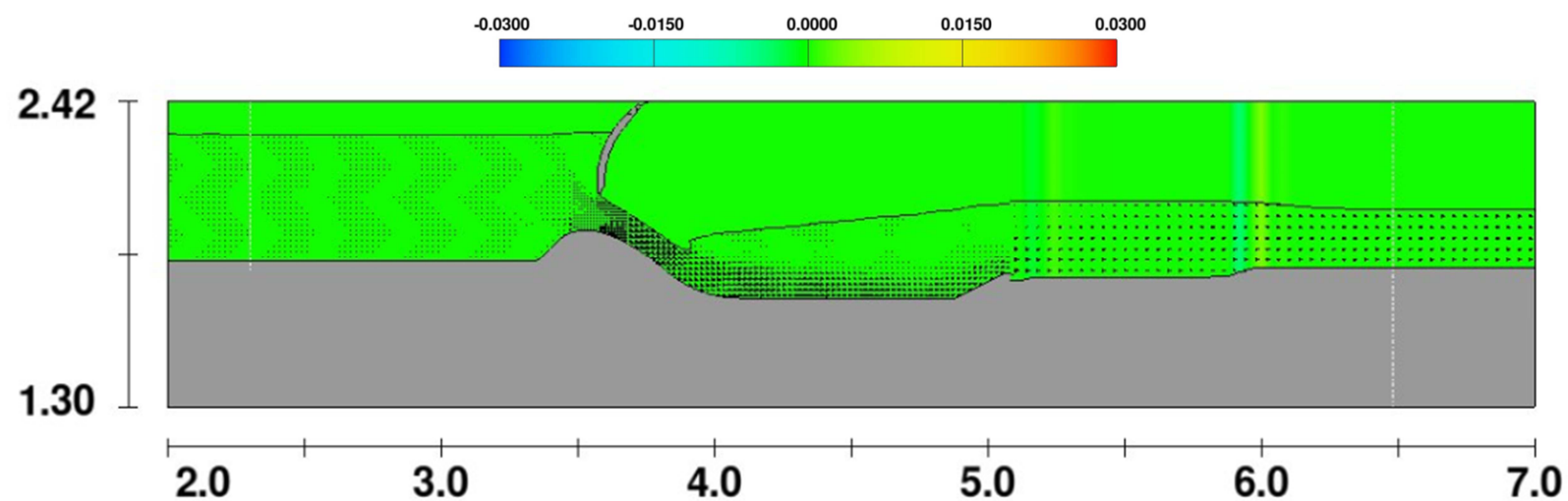
FIGURA 65 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 8$ - PLANTAFIGURA 66 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 8$ – CORTE NO CENTRO DO VÃO

FIGURA 67 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 8$ – CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA

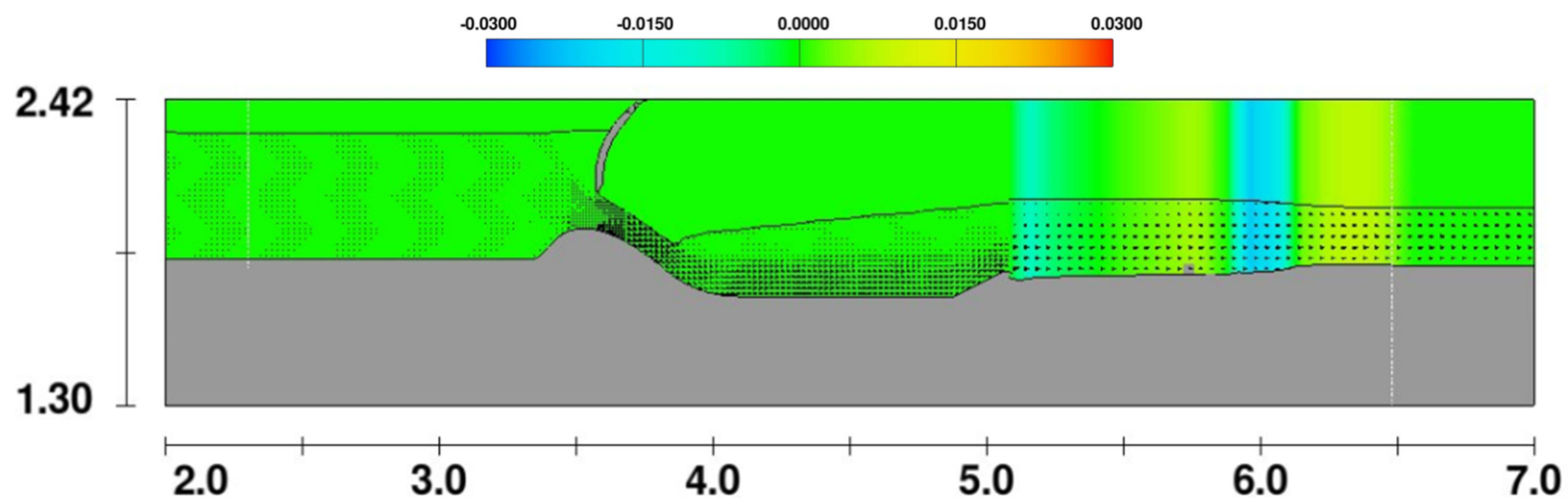


FIGURA 68 – SIMULAÇÃO 1 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 8$ – CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA

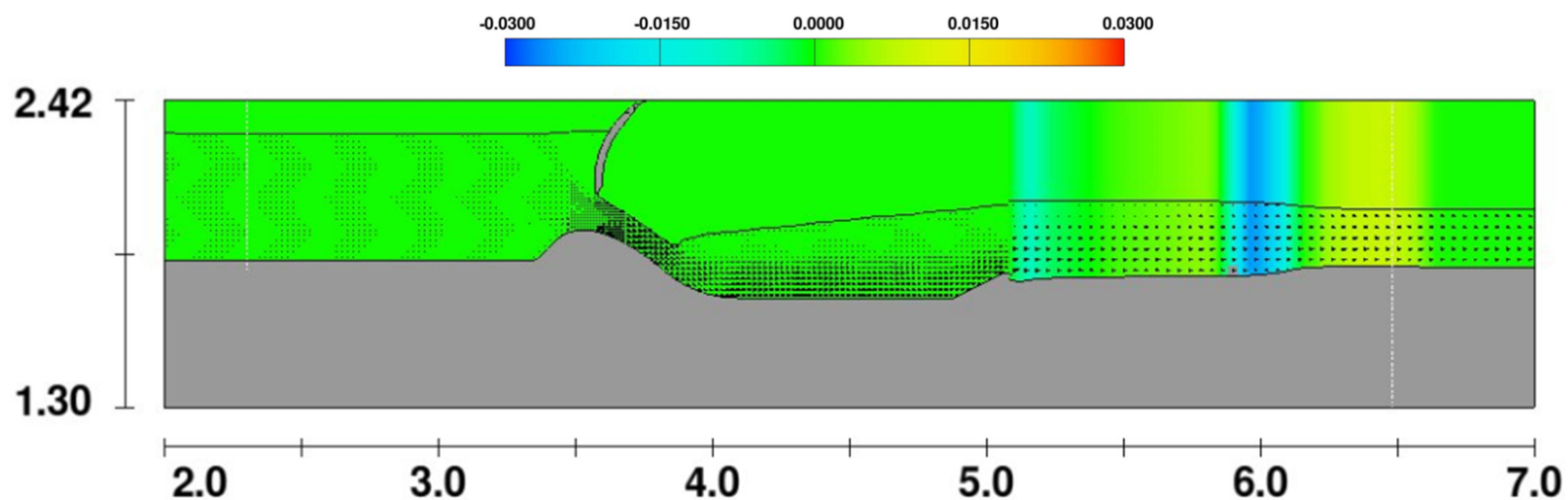


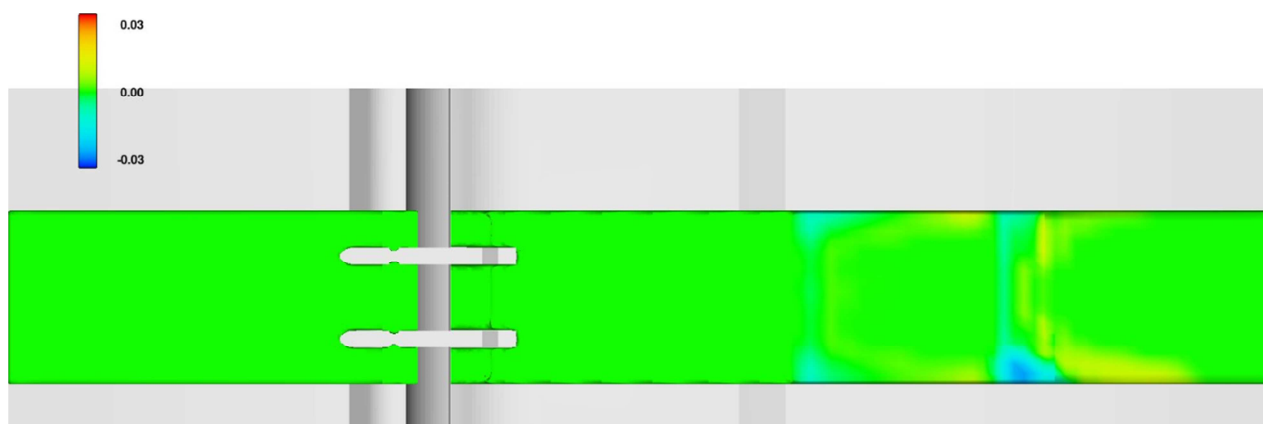
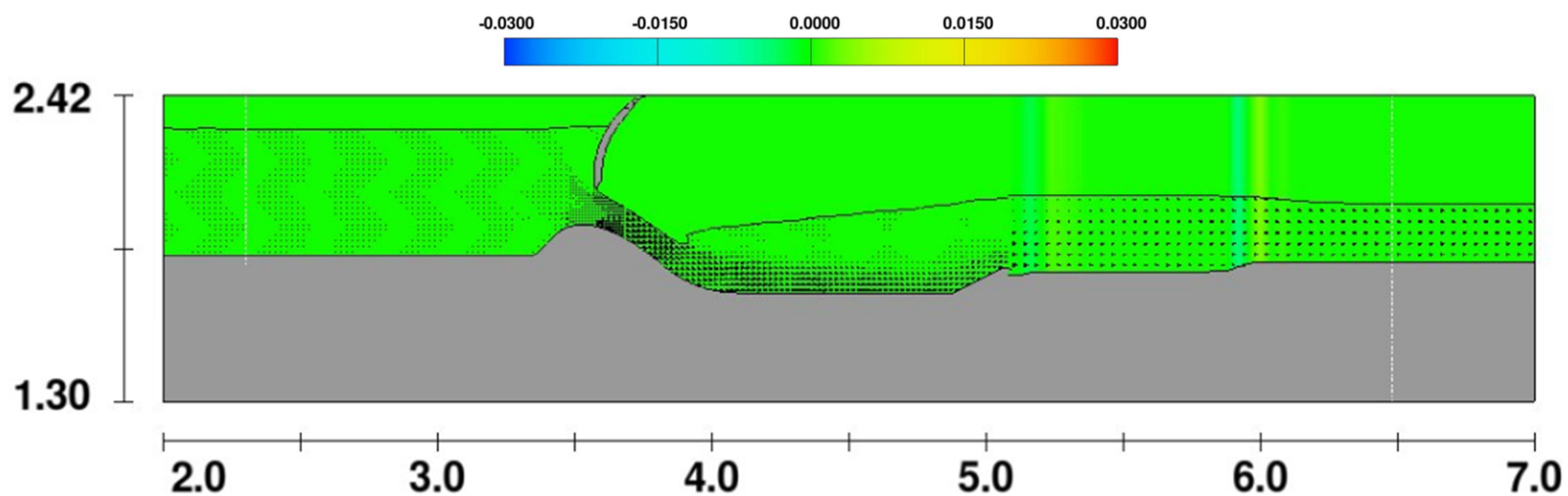
FIGURA 69 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 13$ - PLANTAFIGURA 70 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 13$ – CORTE NO CENTRO DO VÃO

FIGURA 71 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 13$ – CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA

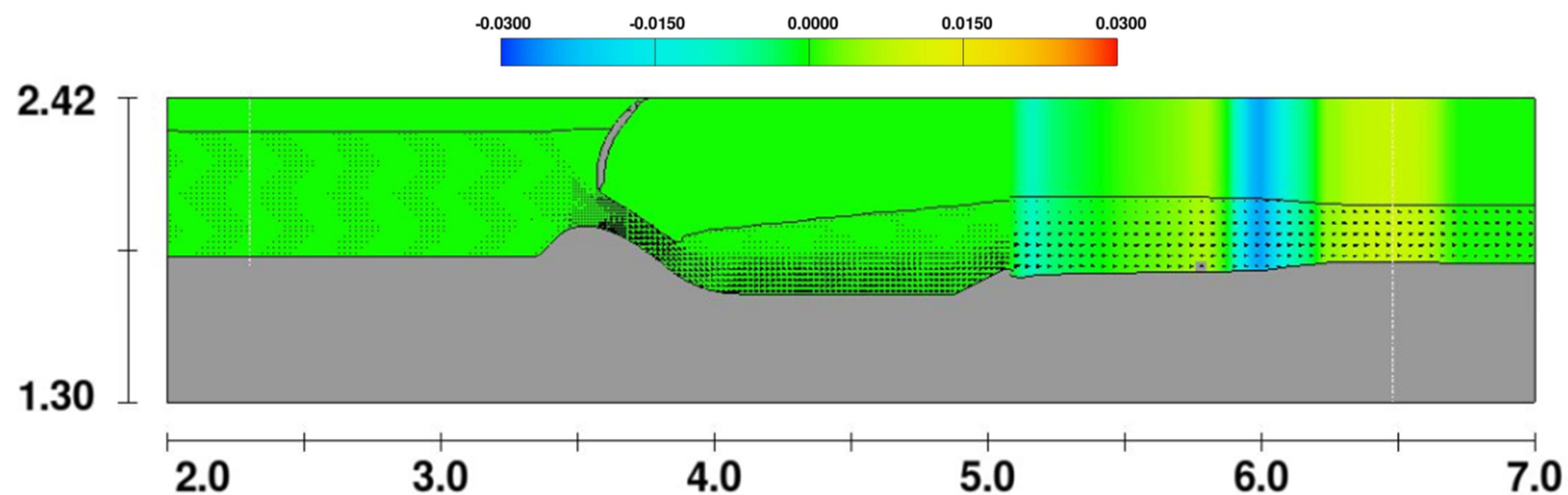


FIGURA 72 – SIMULAÇÃO 2 – MEYER-PETER E MULLER - $\beta_{MPM,n} = 13$ – CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA

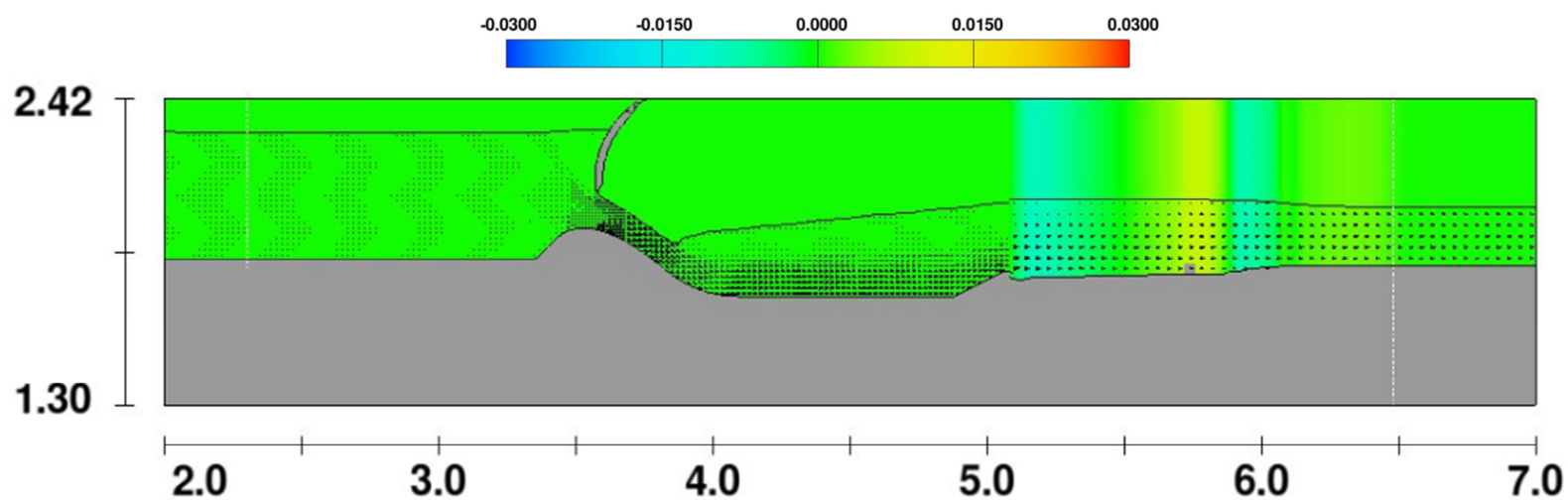


FIGURA 73 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN - PLANTA

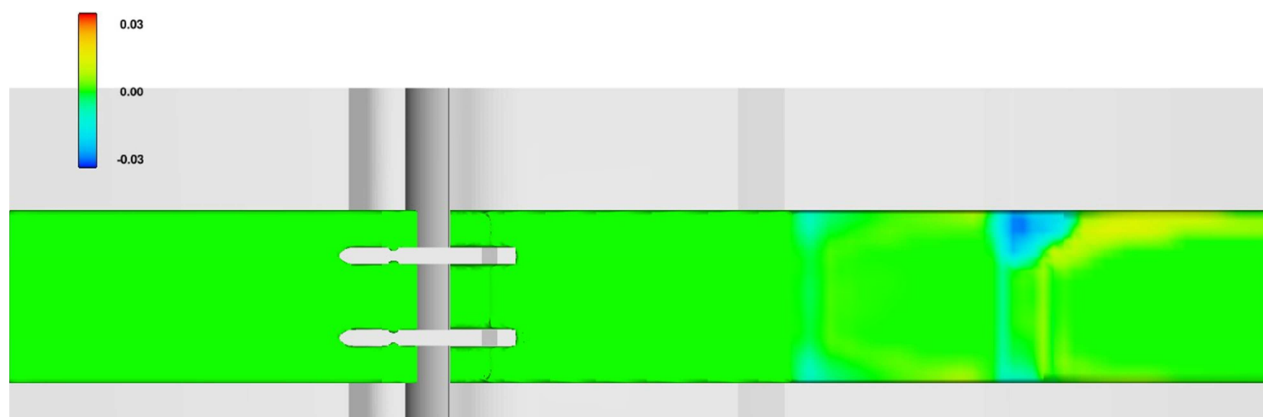


FIGURA 74 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN – CORTE NO CENTRO DO VÃO

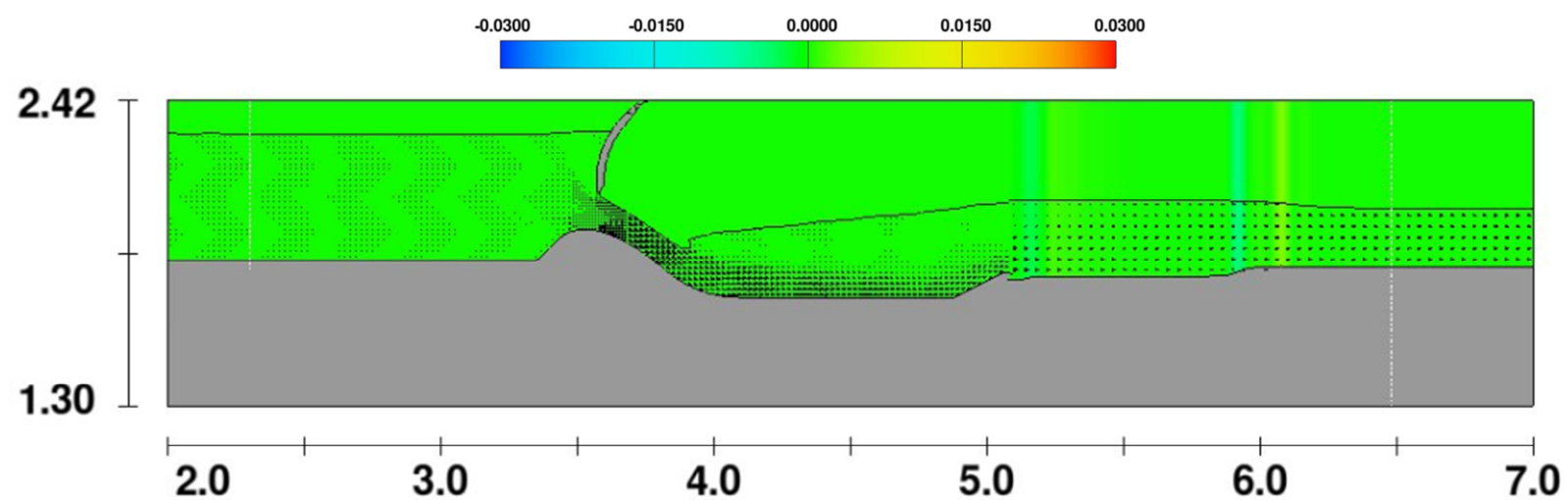


FIGURA 75 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN – CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA

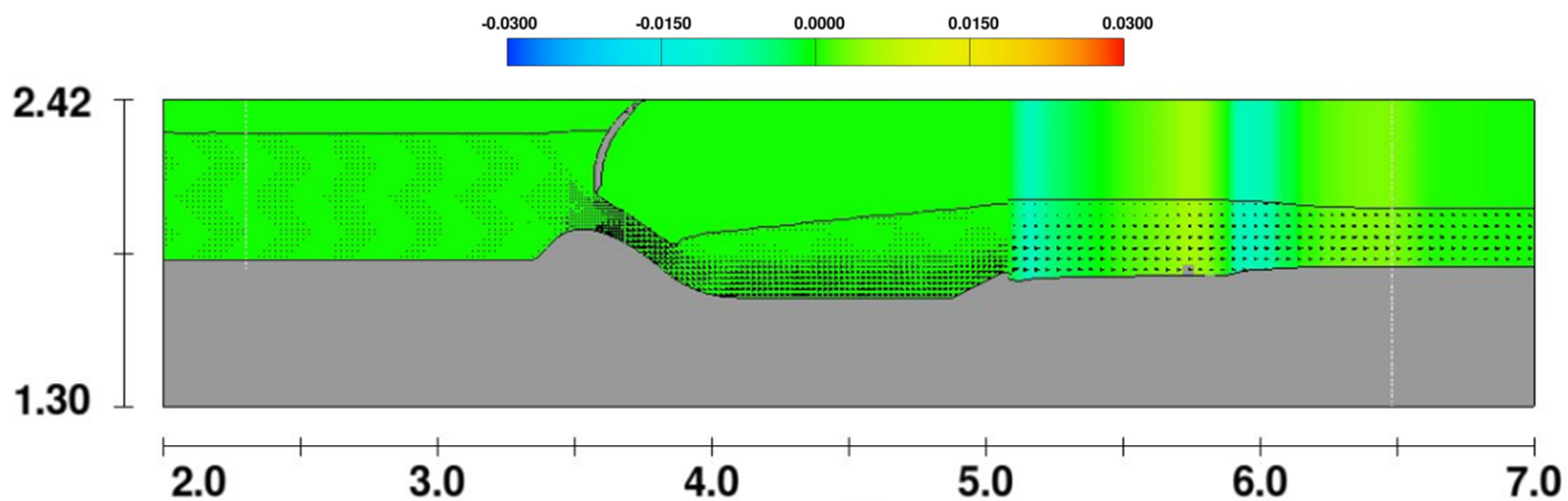


FIGURA 76 – SIMULAÇÃO 3 – NIELSEN – CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA

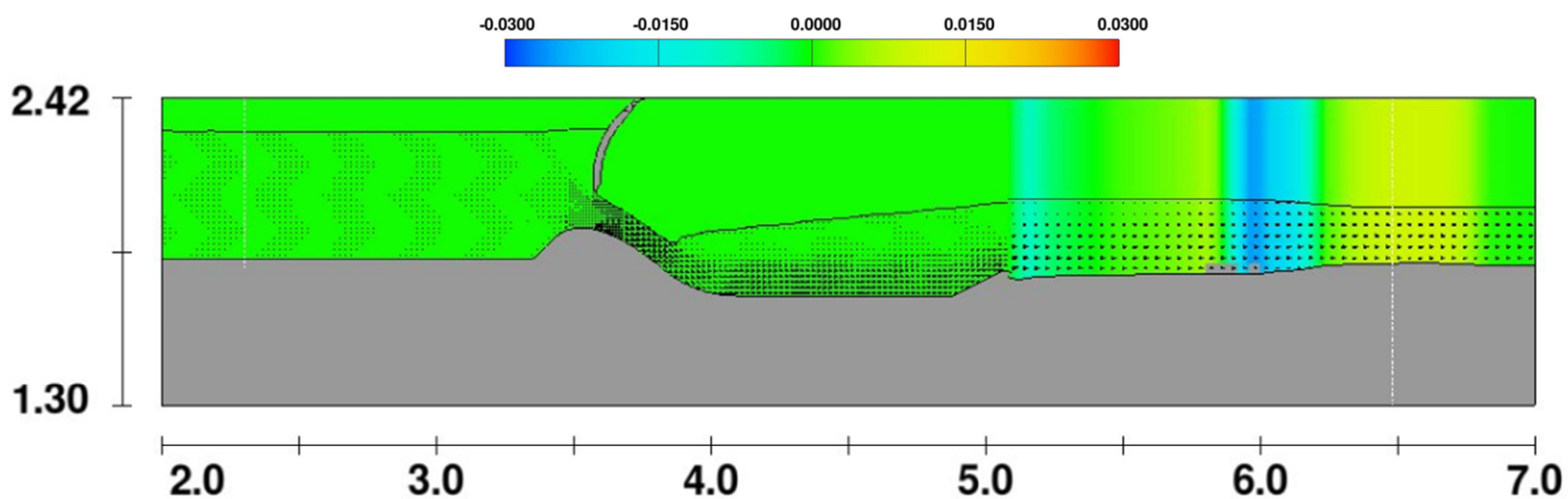


FIGURA 77 – SIMULAÇÃO 4 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO JUNTO AS LATERAIS - PLANTA

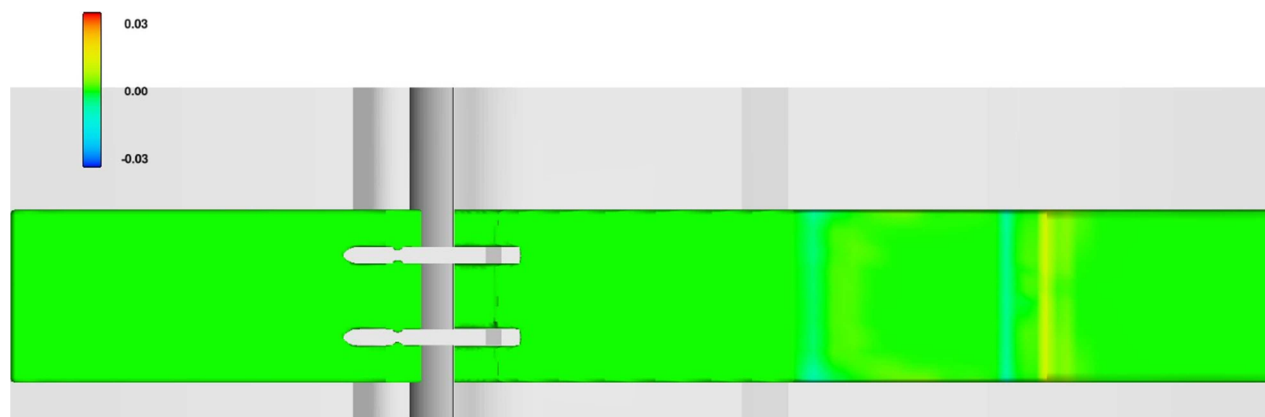


FIGURA 78 – SIMULAÇÃO 4 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE NO CENTRO DO VÃO

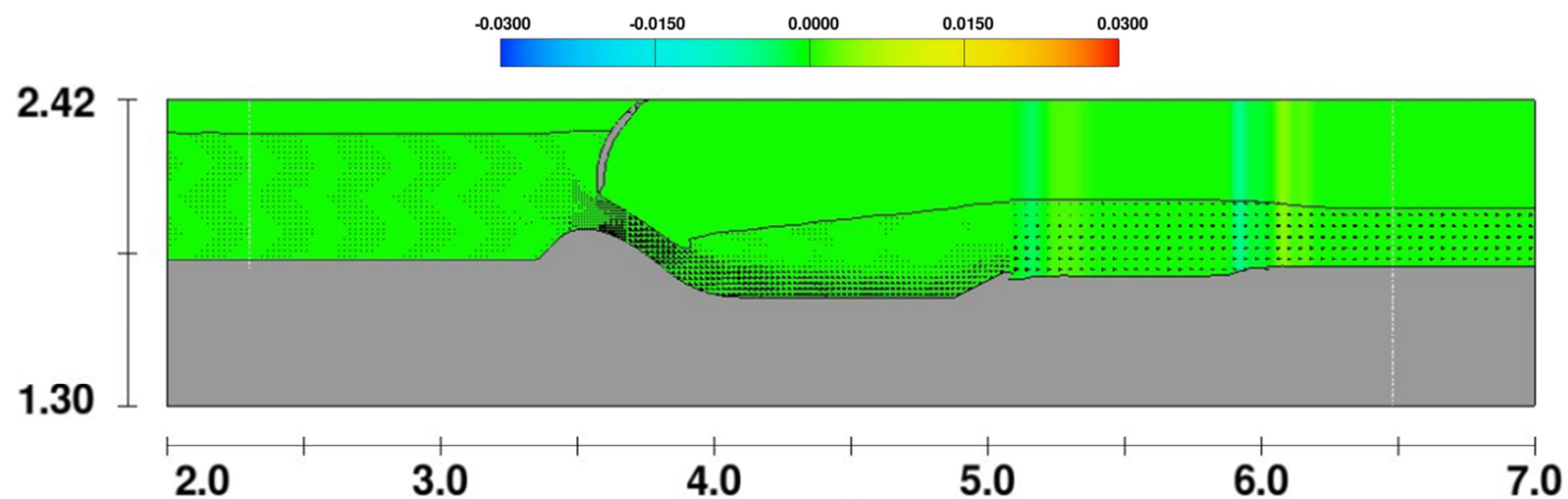


FIGURA 79 – SIMULAÇÃO 4 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA

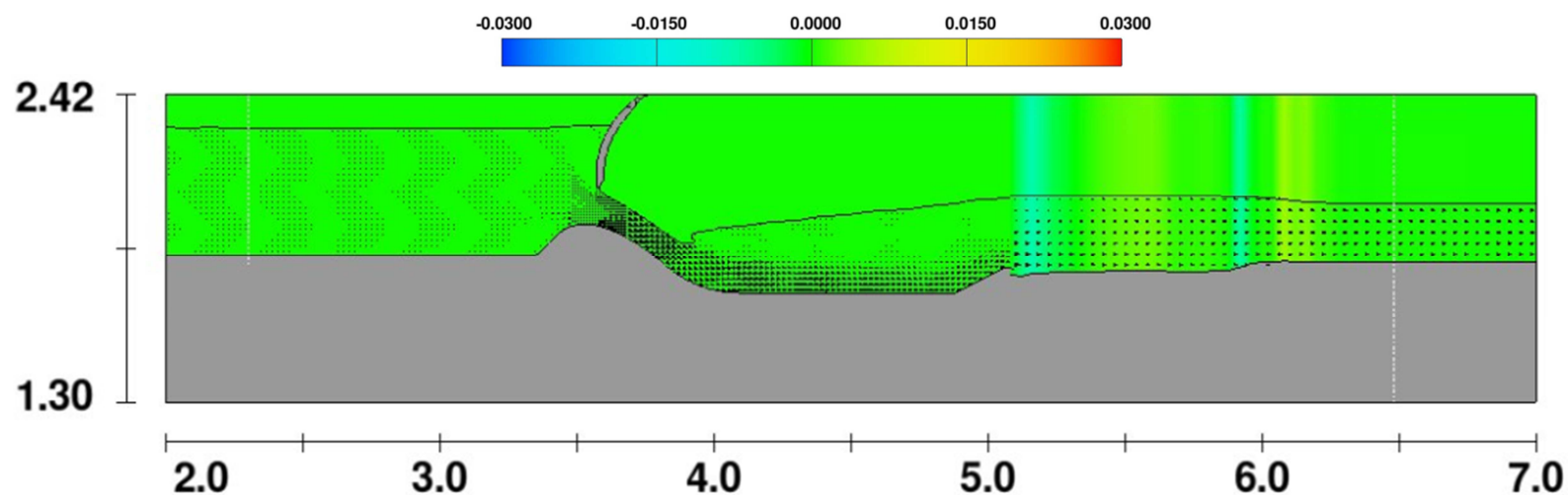


FIGURA 80 – SIMULAÇÃO 4 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA

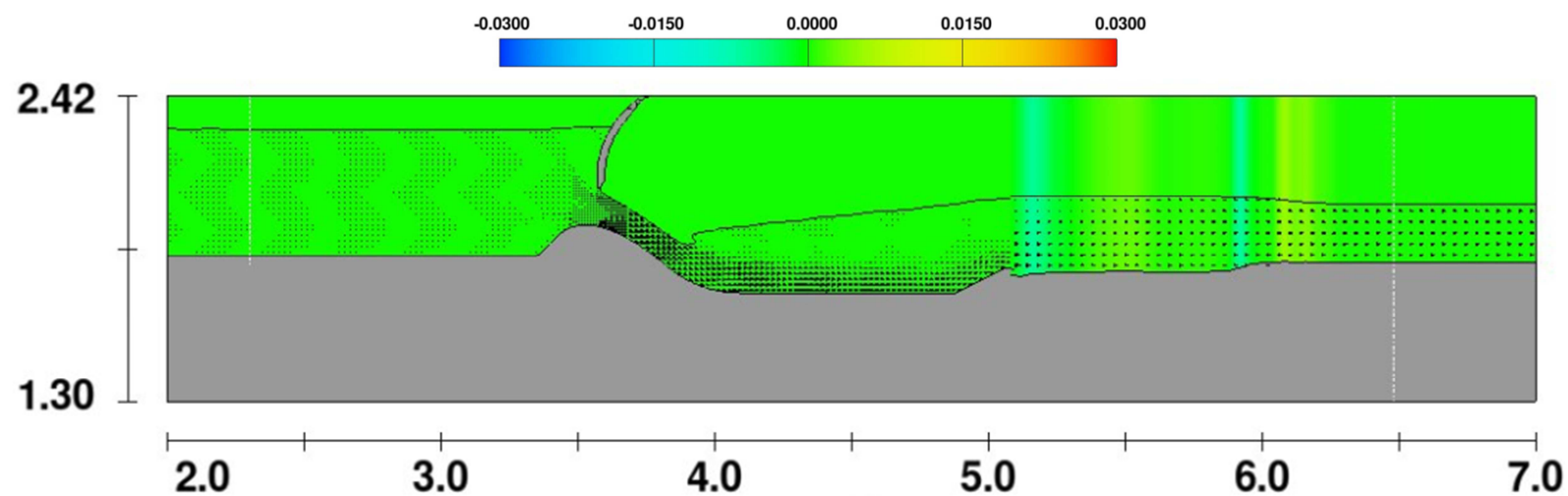


FIGURA 81 – SIMULAÇÃO 5 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – ÂNGULO DE ATRITO = 20° - PLANTA

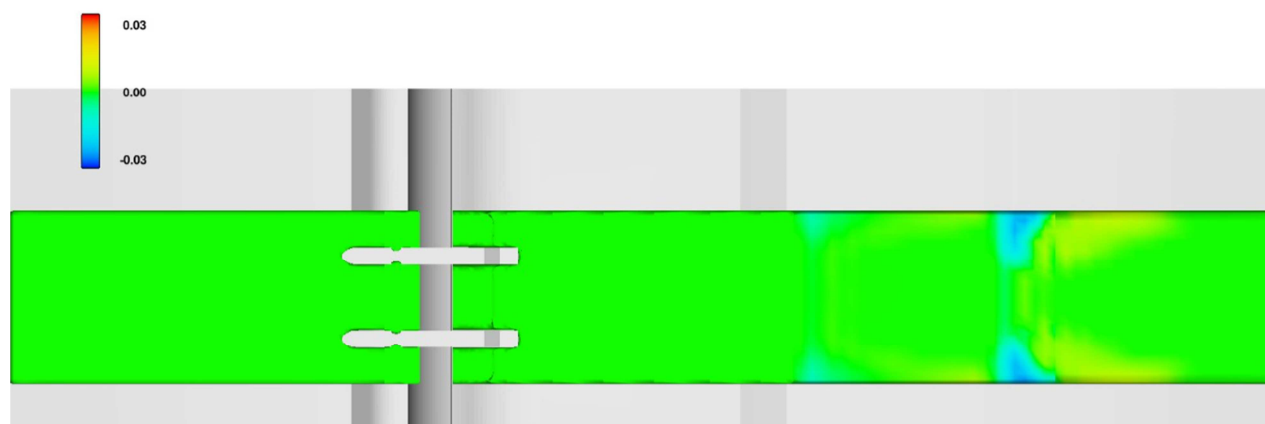


FIGURA 82 – SIMULAÇÃO 5 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – ÂNGULO DE ATRITO = 20° - CORTE NO CENTRO DO VÃO

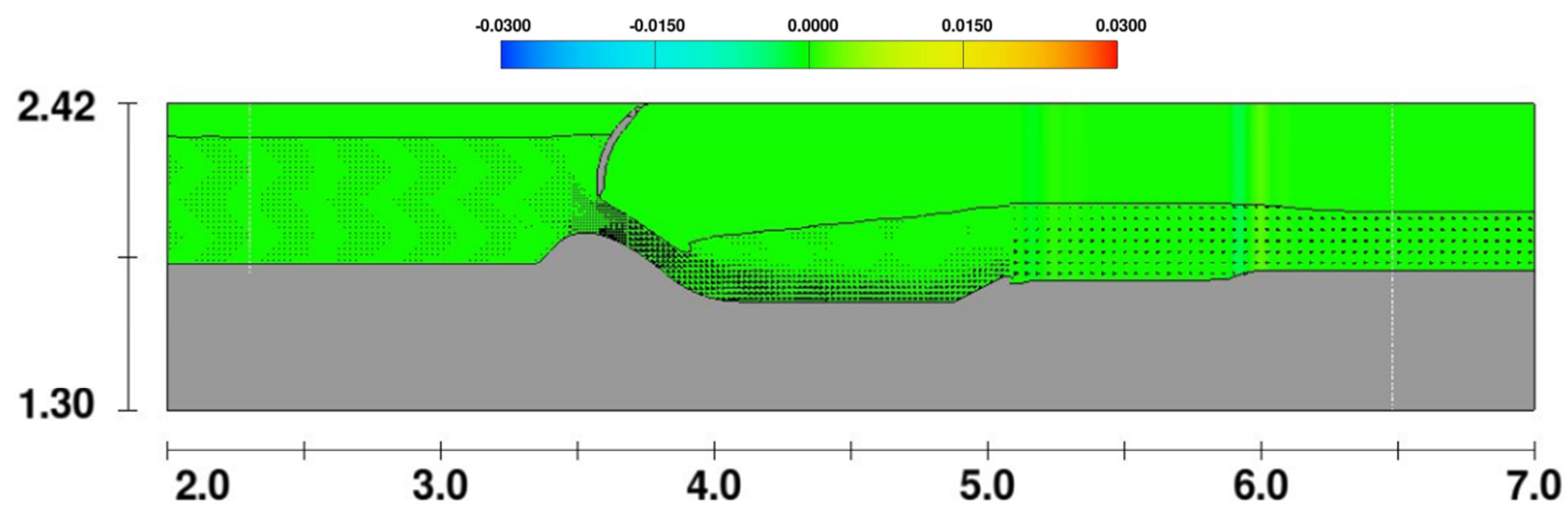


FIGURA 83 – SIMULAÇÃO 5 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – ÂNGULO DE ATRITO = 20° - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA

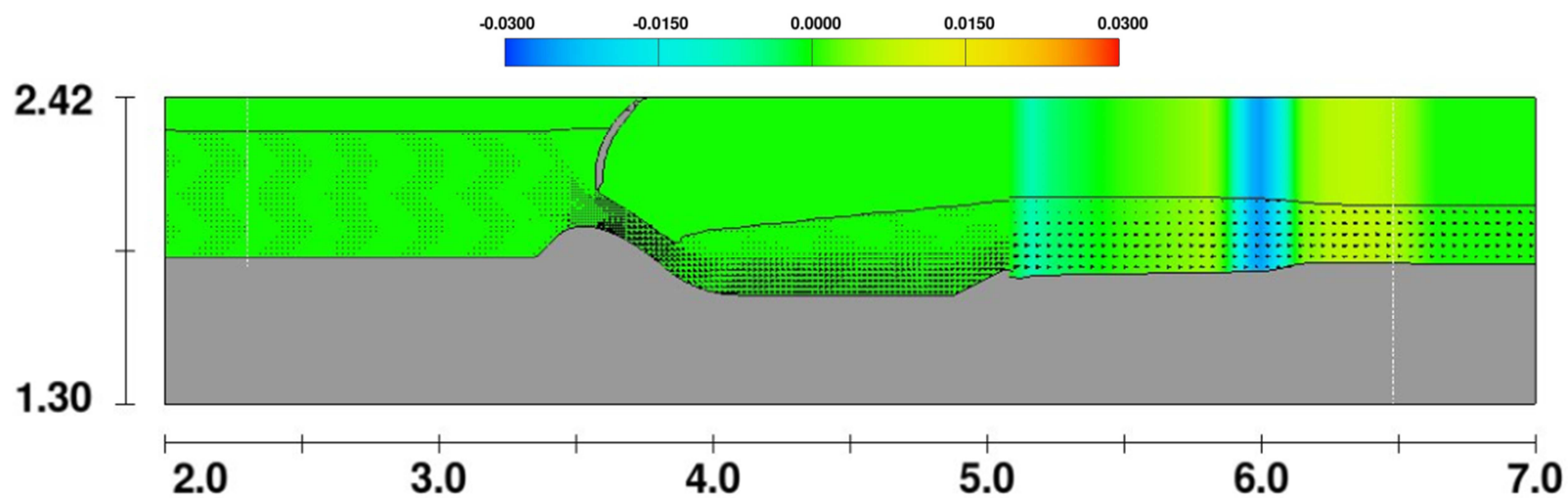


FIGURA 84 – SIMULAÇÃO 5 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – ÂNGULO DE ATRITO = 20° - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA

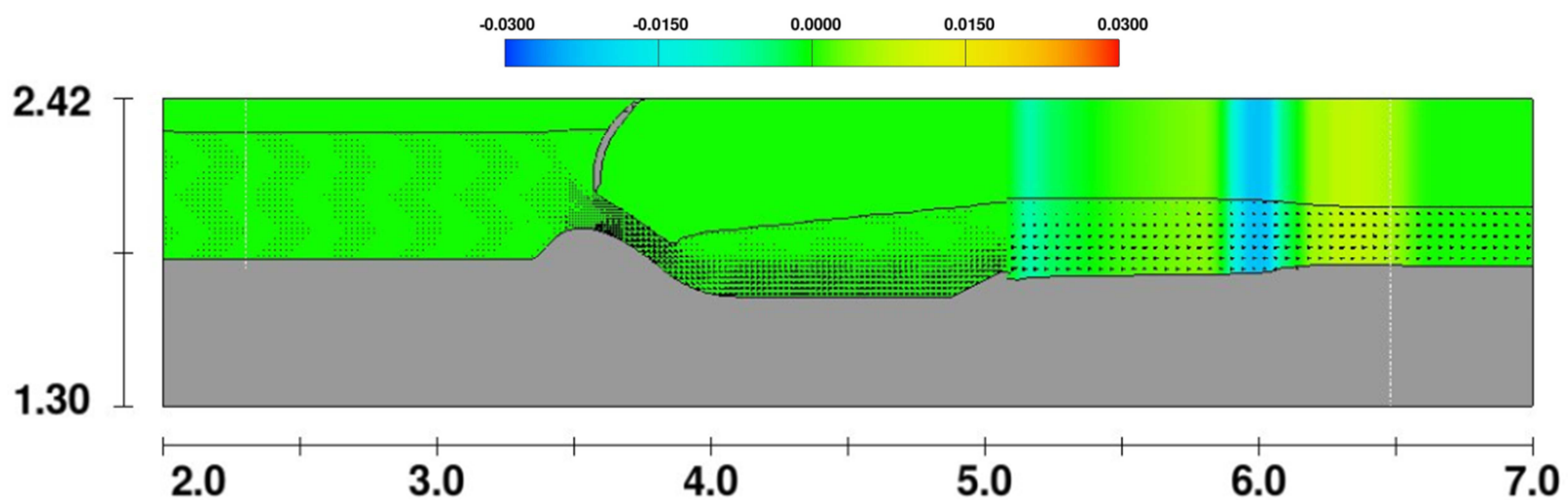


FIGURA 85 – SIMULAÇÃO 6 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO JUNTO AS LATERAIS E ÂNGULO DE ATRITO DE 20° - PLANTA

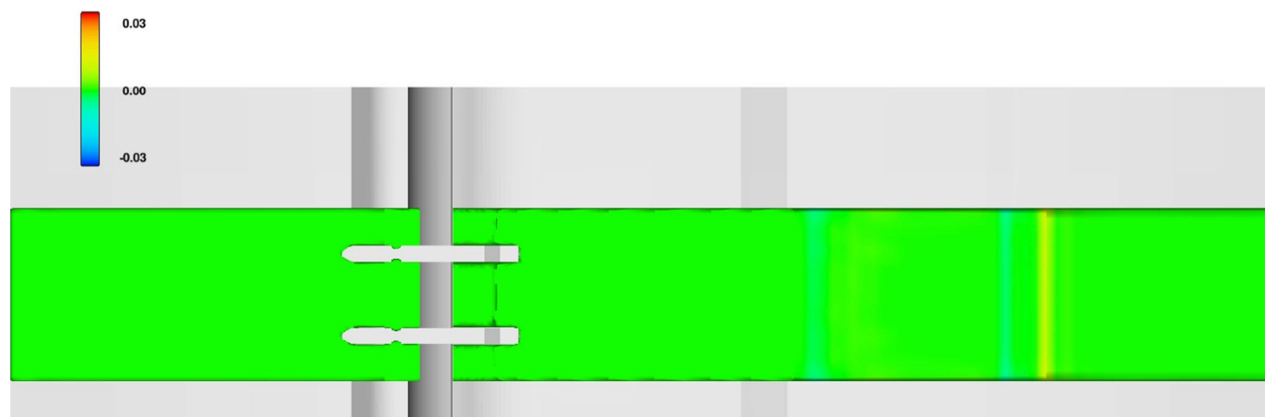


FIGURA 86 – SIMULAÇÃO 6 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTORNO NAS LATERAIS E ÂNGULO DE ATRITO DE 20° - CORTE NO CENTRO DO VÃO

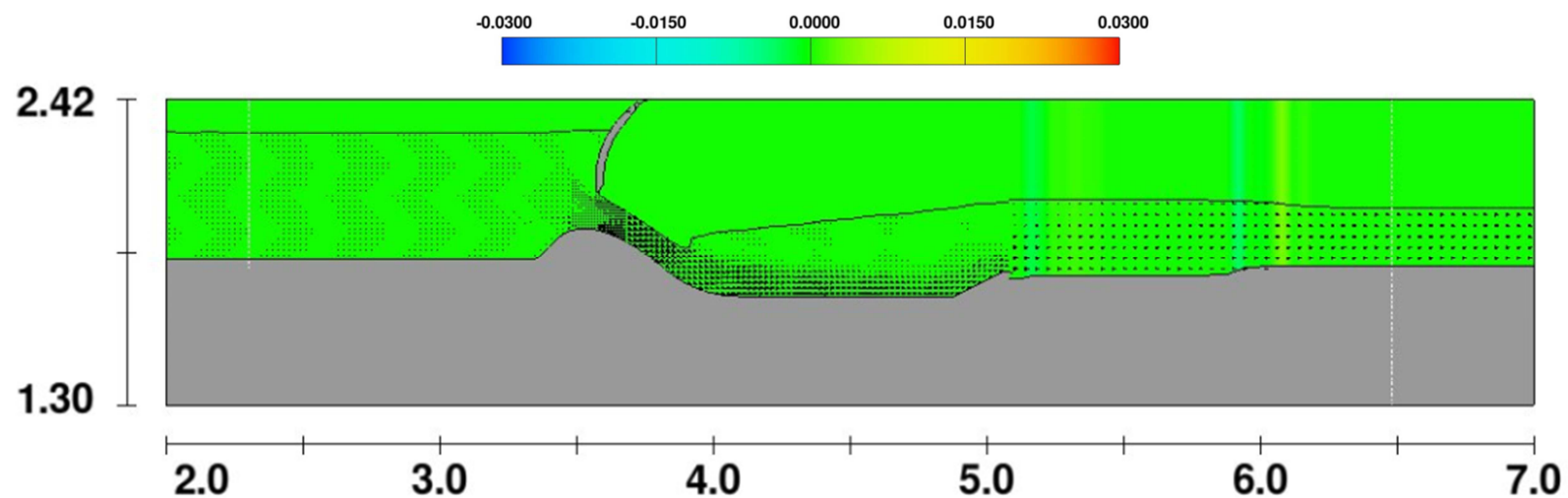


FIGURA 87 – SIMULAÇÃO 6 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTO RNO NAS LATERAIS E ÂNGULO DE ATRITO DE 20° - CORTE

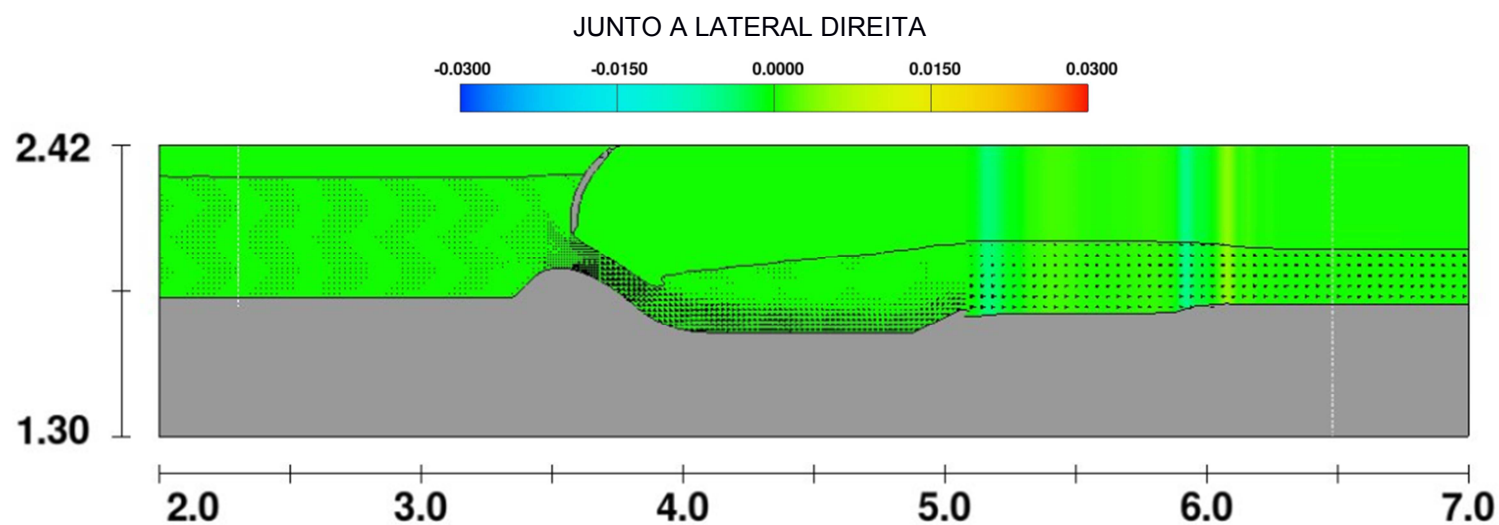


FIGURA 88 – SIMULAÇÃO 6 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – CONDIÇÃO DE CONTO RNO NAS LATERAIS E ÂNGULO DE ATRITO DE 20° - CORTE

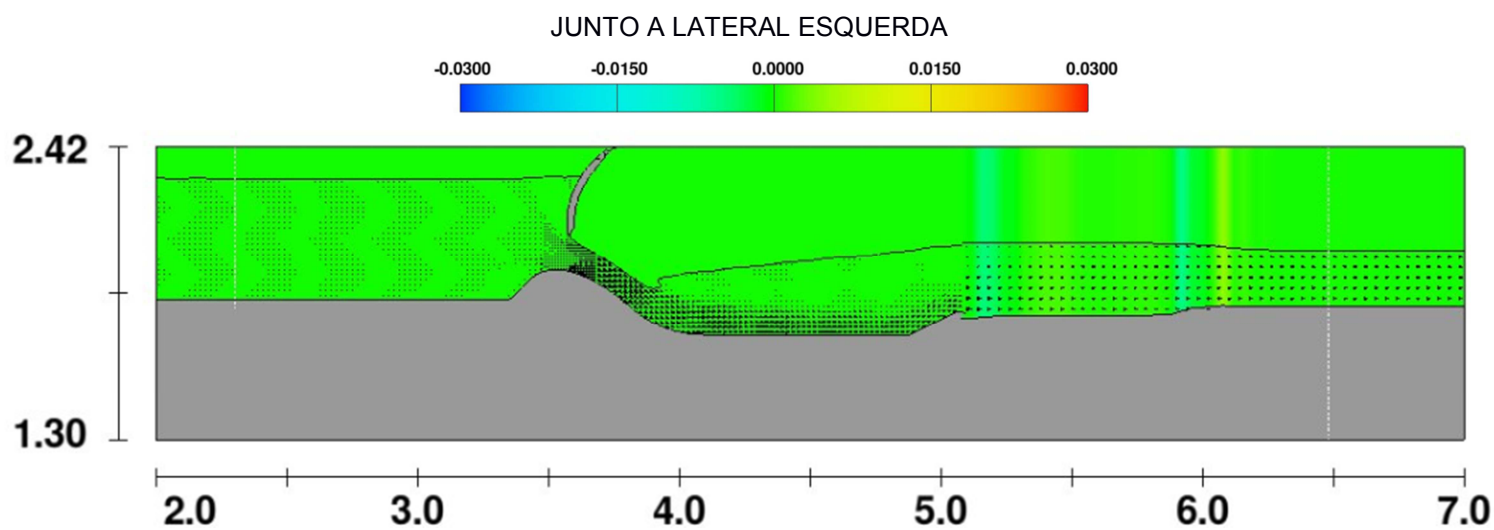


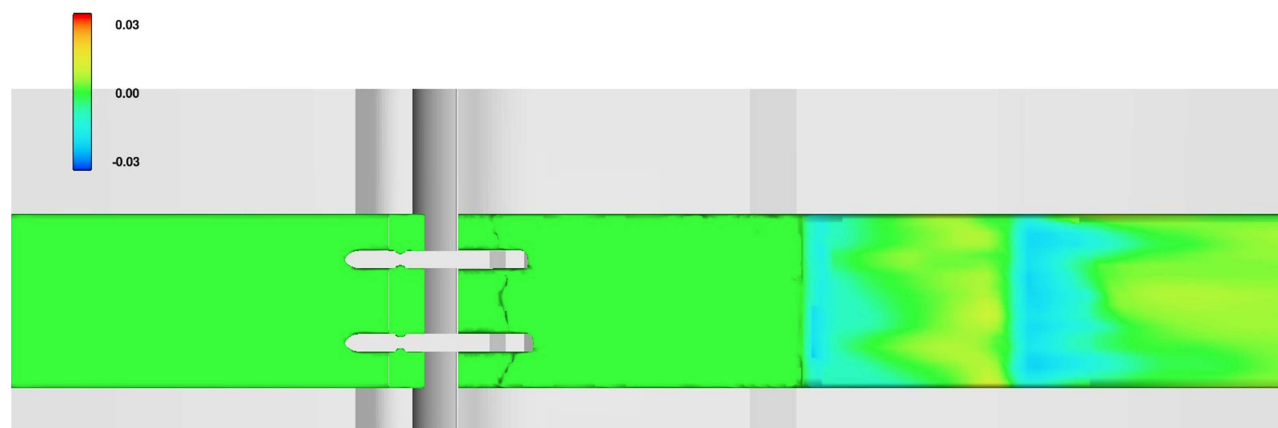
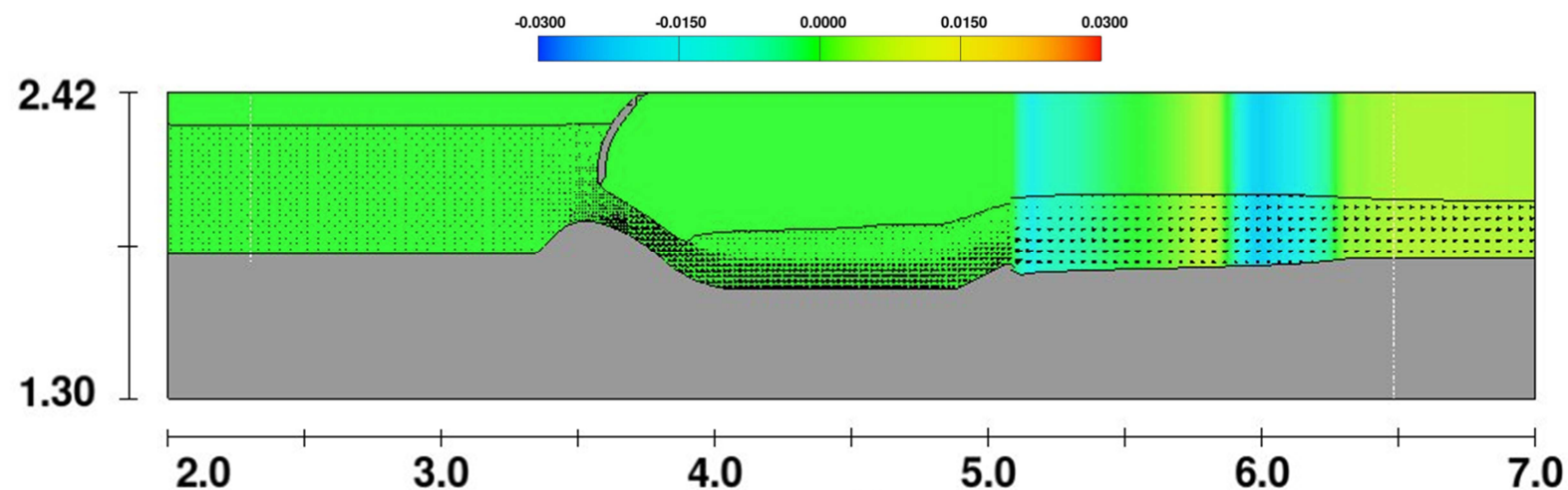
FIGURA 89 – SIMULAÇÃO 7 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ - PLANTAFIGURA 90 – SIMULAÇÃO 7 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ - CORTE NO CENTRO DO VÃO

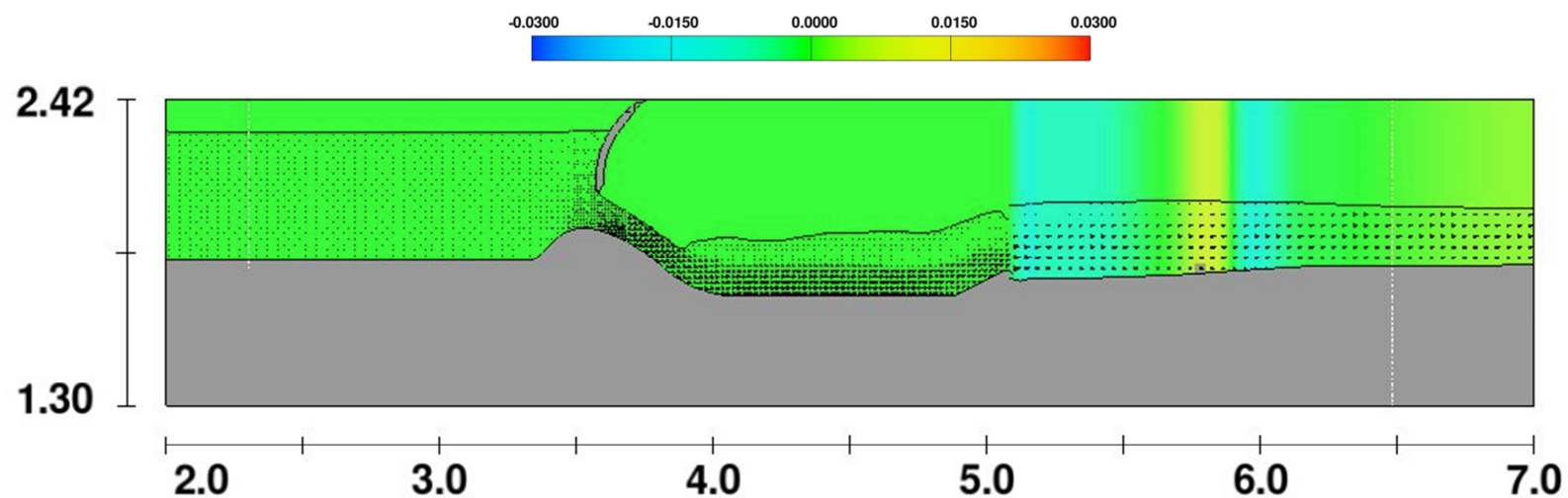
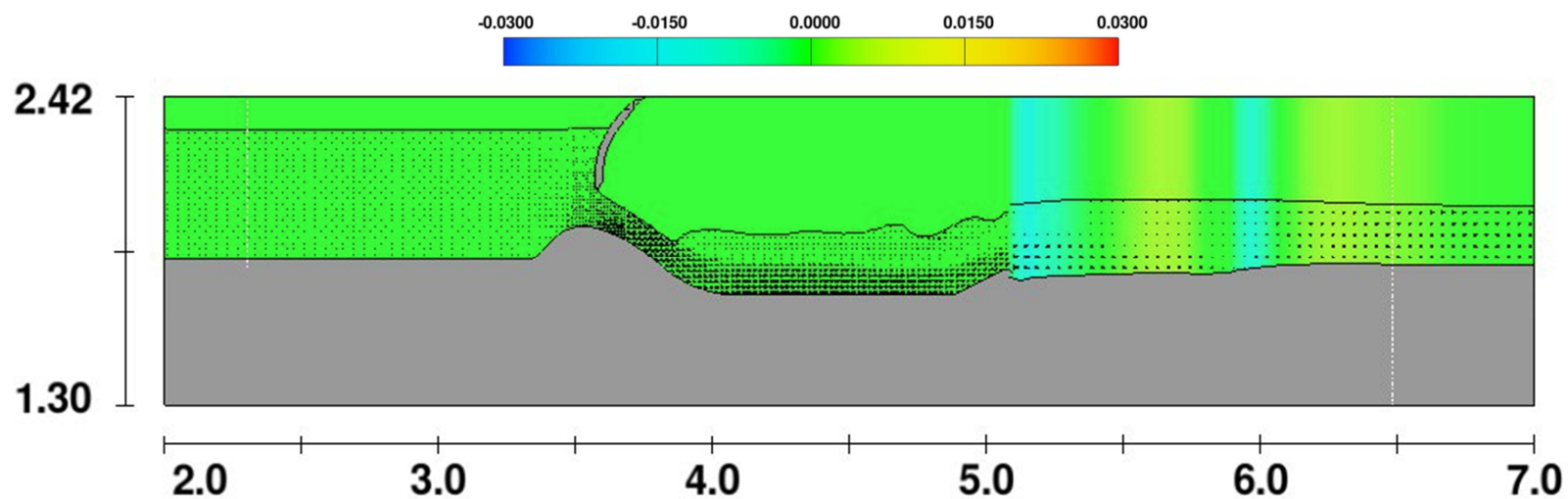
FIGURA 91 – SIMULAÇÃO 7 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITAFIGURA 92 – SIMULAÇÃO 7 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA

FIGURA 93 – SIMULAÇÃO 8 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - PLANTA

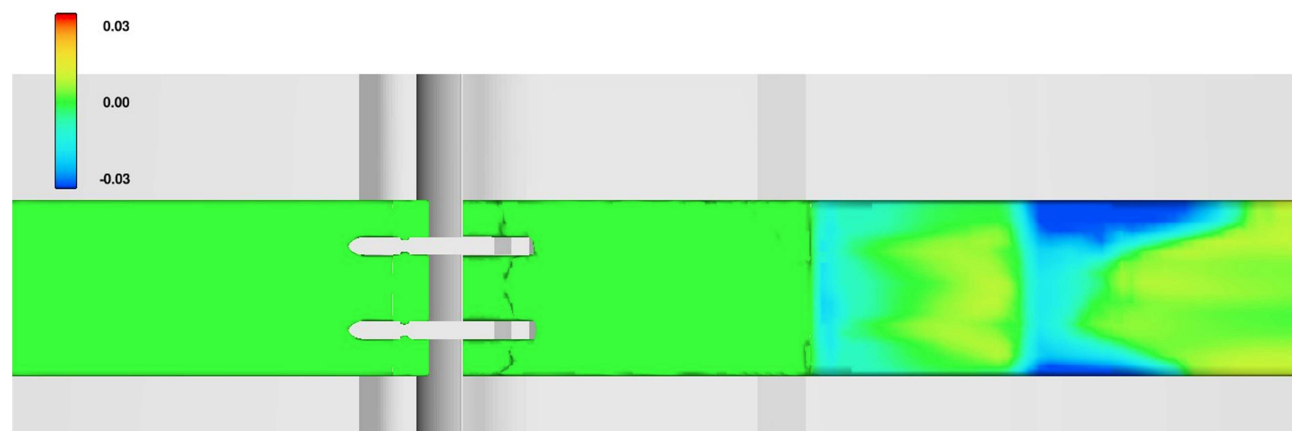


FIGURA 94 – SIMULAÇÃO 8 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE NO CENTRO DO VÃO

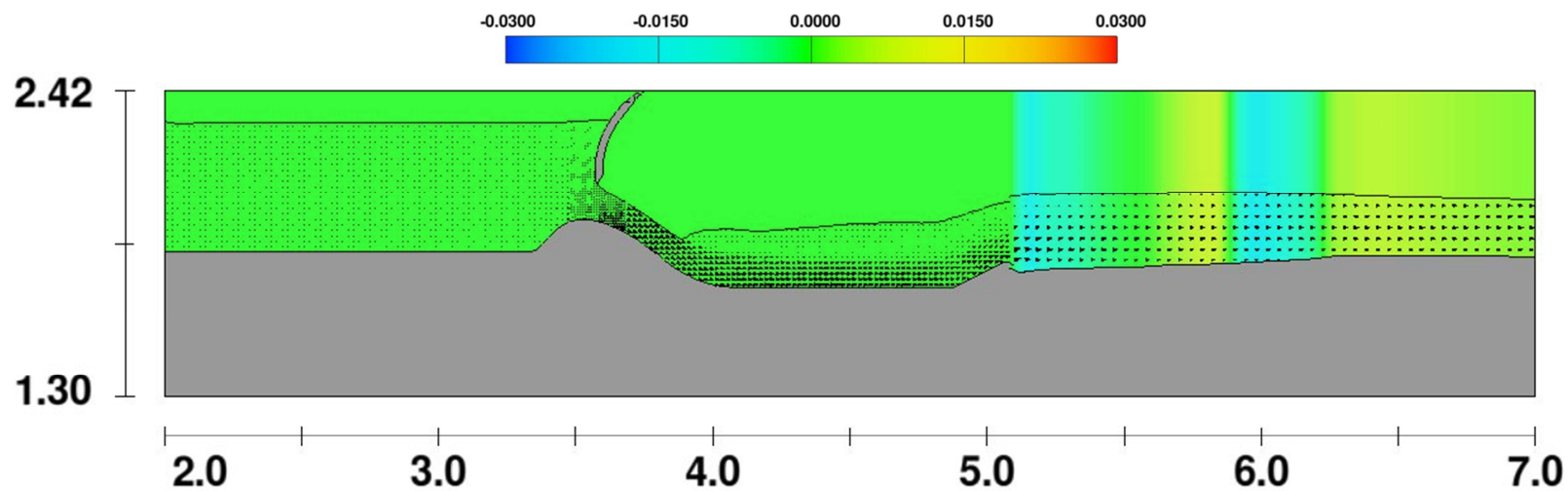


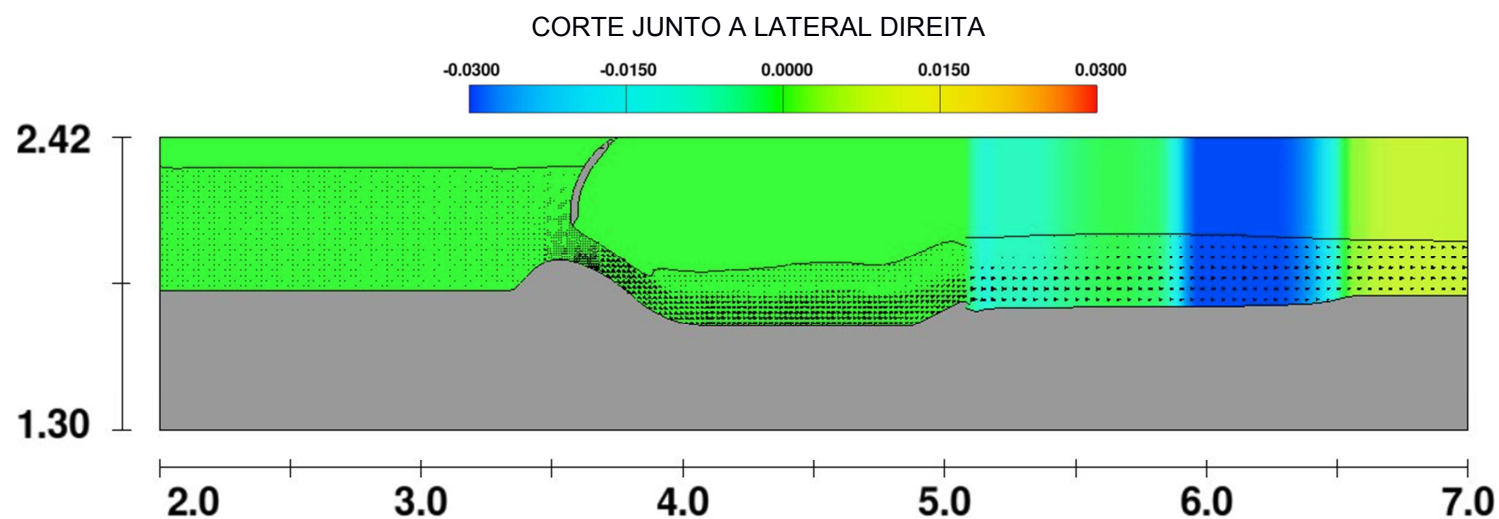
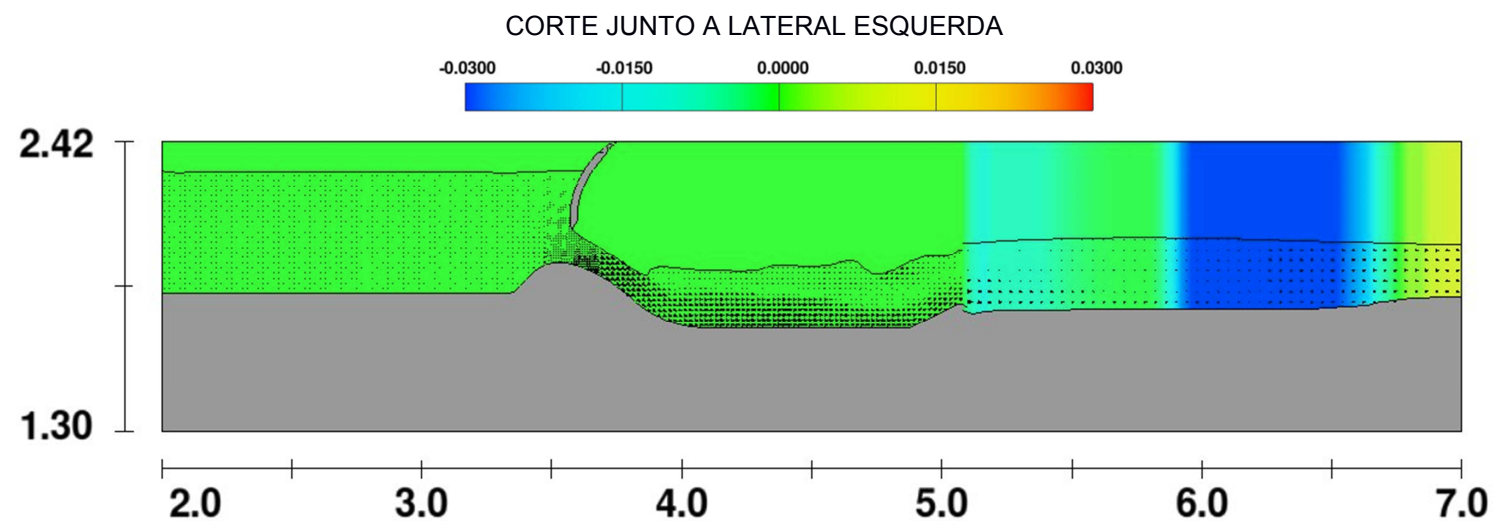
FIGURA 95 – SIMULAÇÃO 8 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS -FIGURA 96 – SIMULAÇÃO 8 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \omega$ E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS -

FIGURA 97 – SIMULAÇÃO 9 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM - PLANTA

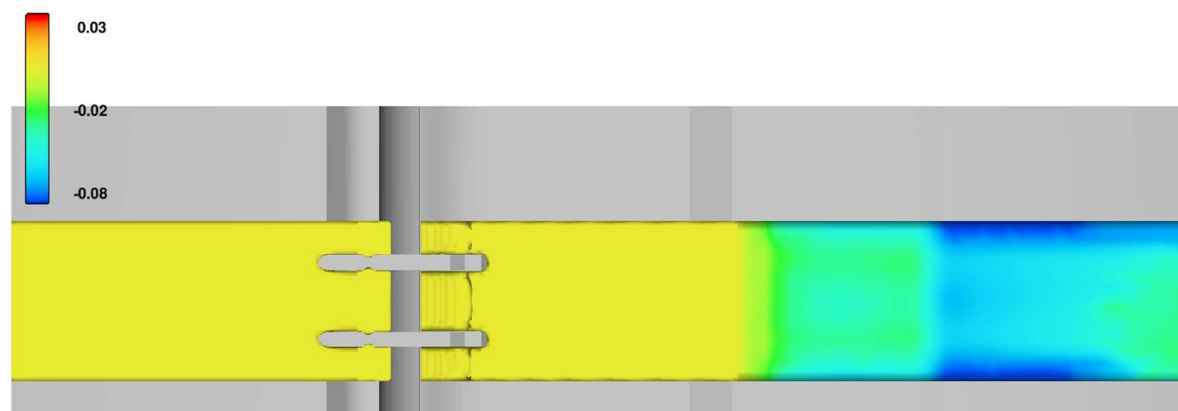


FIGURA 98 – SIMULAÇÃO 9 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM - CORTE NO CENTRO DO VÃO

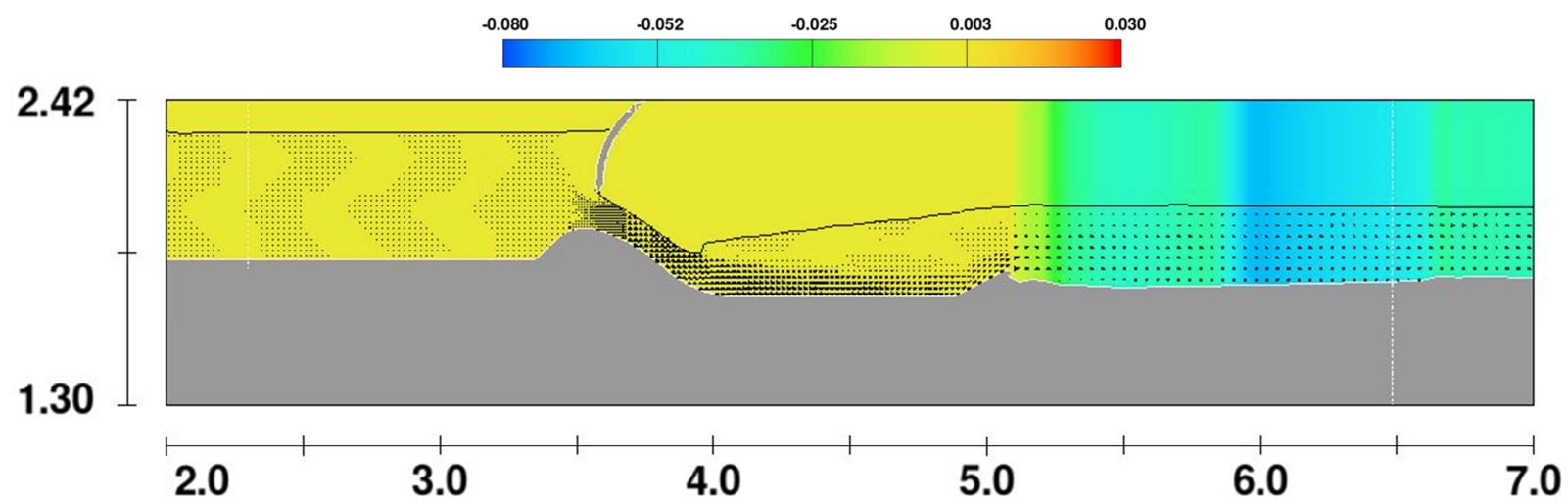


FIGURA 99 – SIMULAÇÃO 9 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM - CORTE JUNTO A LATERAL

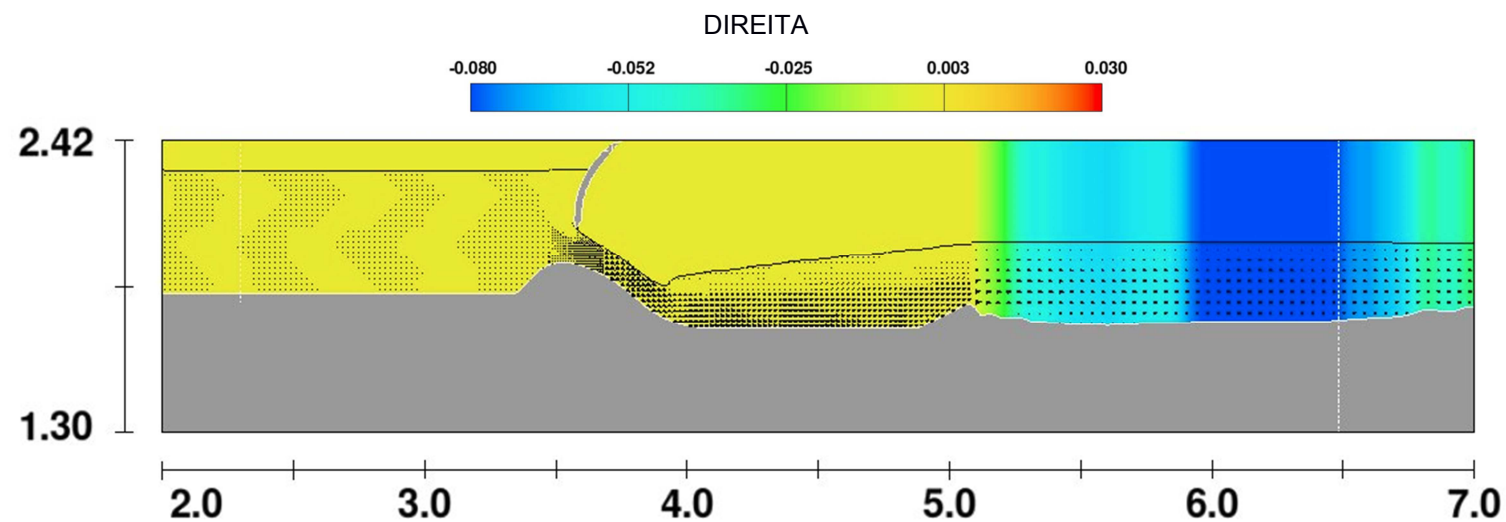


FIGURA 100 – SIMULAÇÃO 9 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM - CORTE JUNTO A

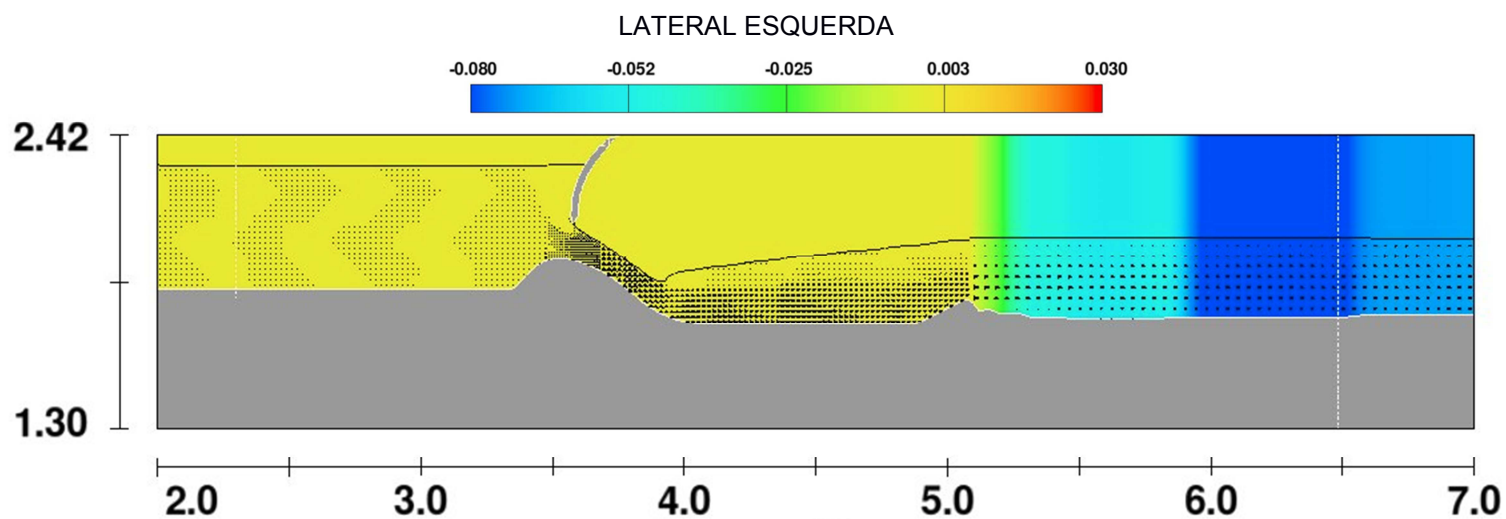


FIGURA 101 – SIMULAÇÃO 10 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - PLANTA

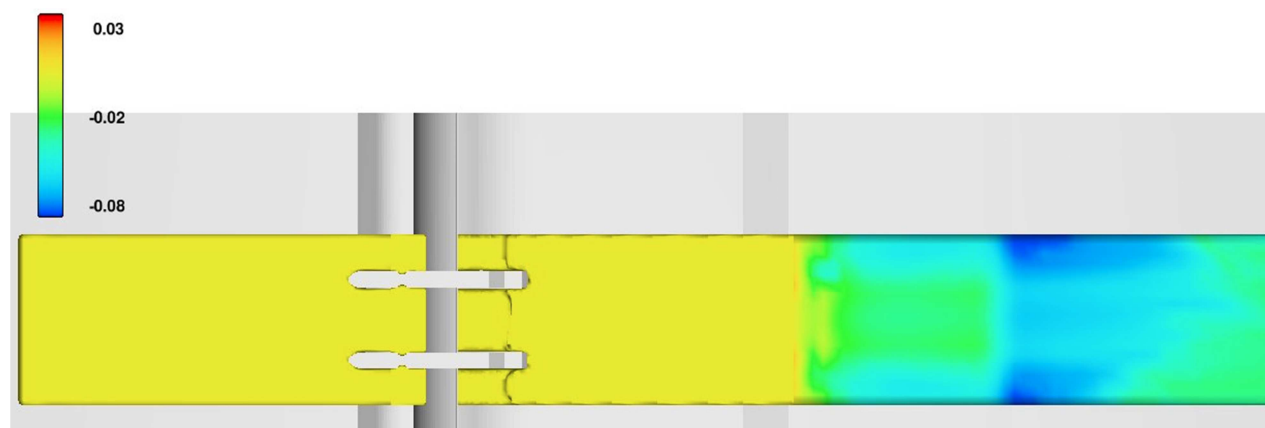


FIGURA 102 – SIMULAÇÃO 10 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE NO CENTRO DO VÃO

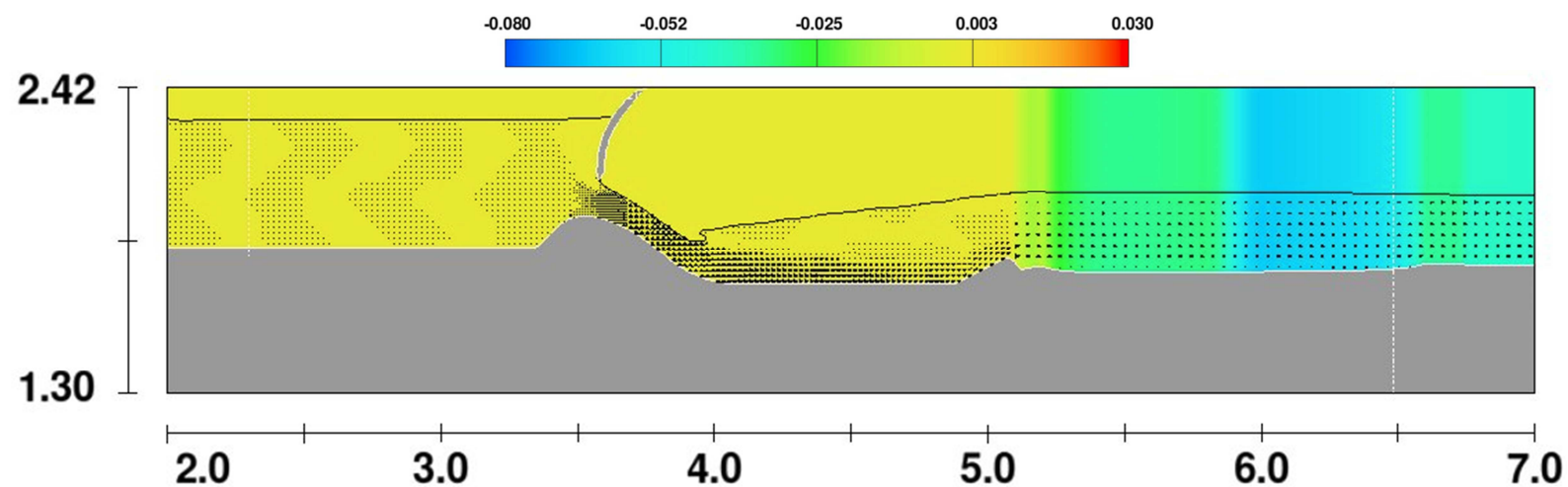


FIGURA 103 – SIMULAÇÃO 10 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA

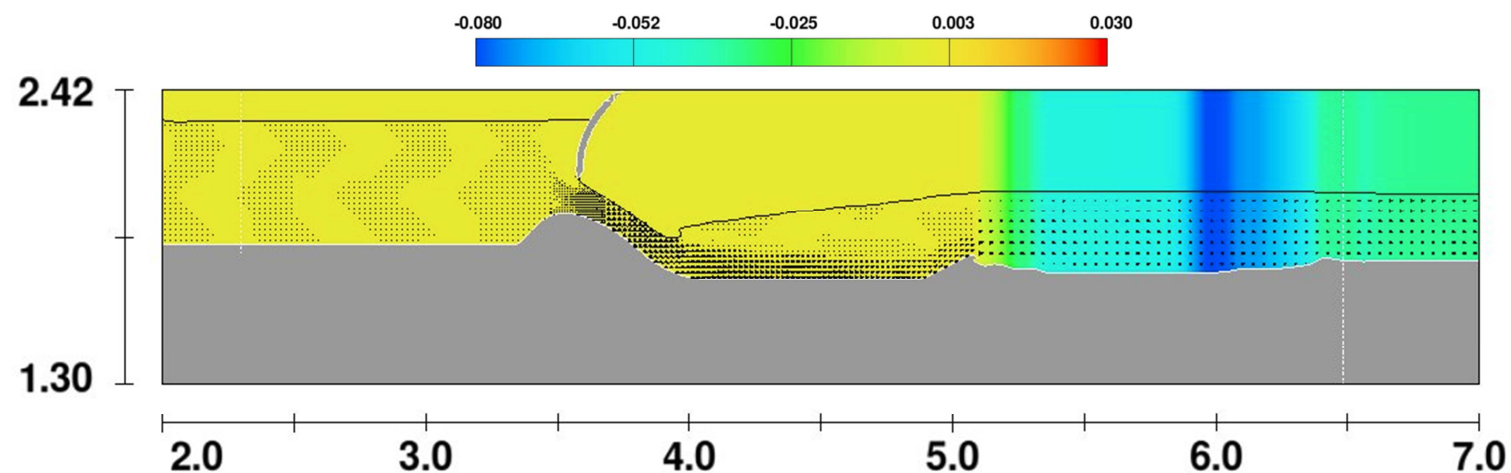


FIGURA 104 – SIMULAÇÃO 10 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 1,5 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA

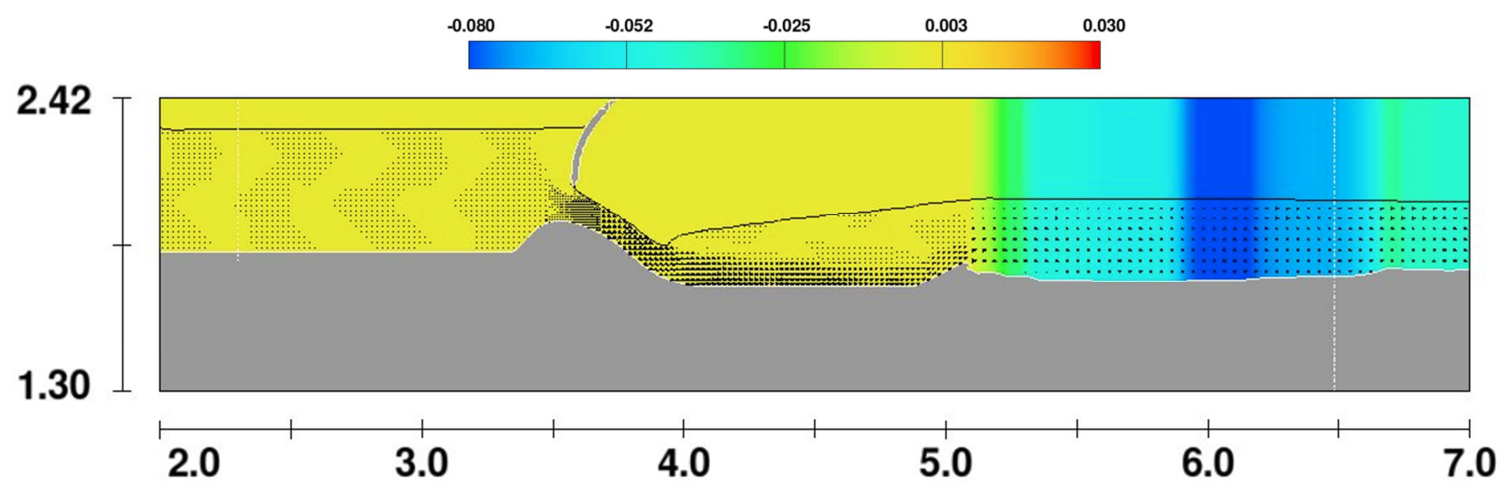


FIGURA 105 – SIMULAÇÃO 11 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM - PLANTA

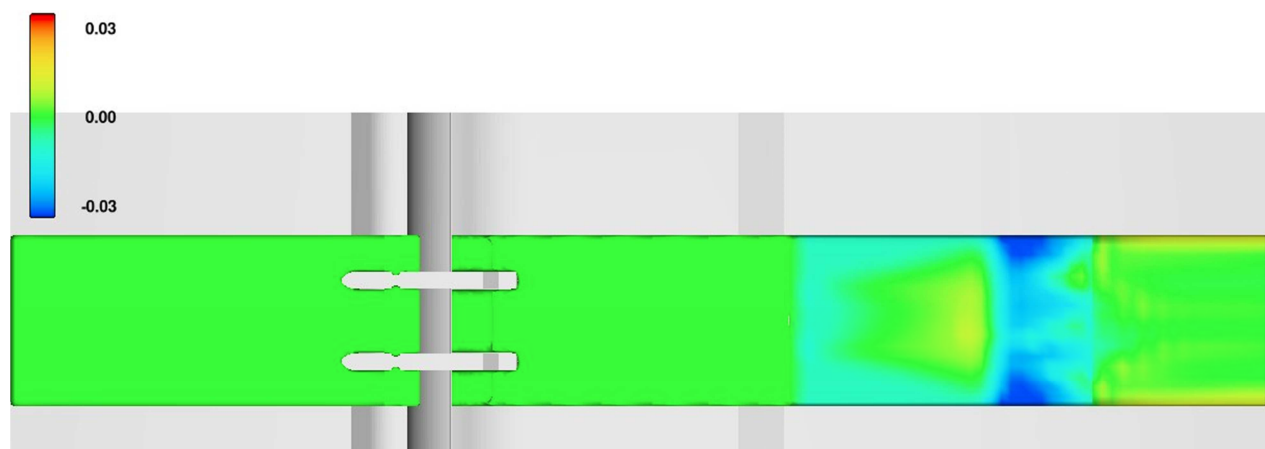


FIGURA 106 – SIMULAÇÃO 11 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM - CORTE NO CENTRO DO

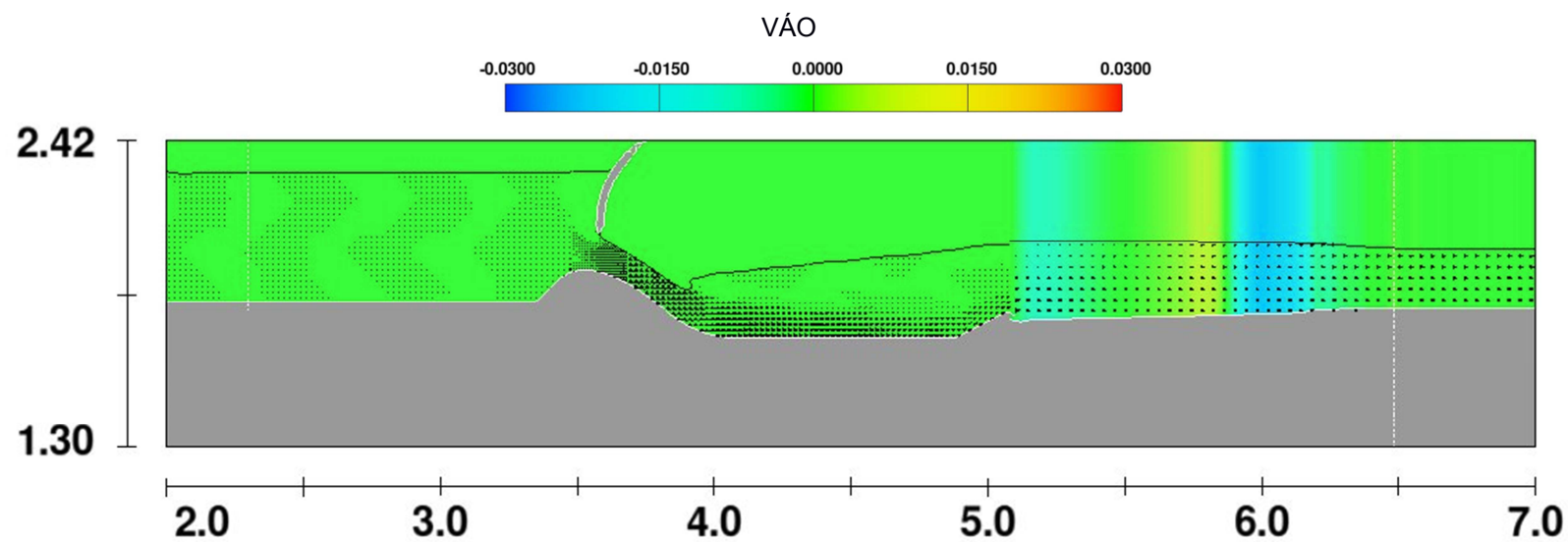


FIGURA 107 – SIMULAÇÃO 11 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM - CORTE JUNTO A LATERAL

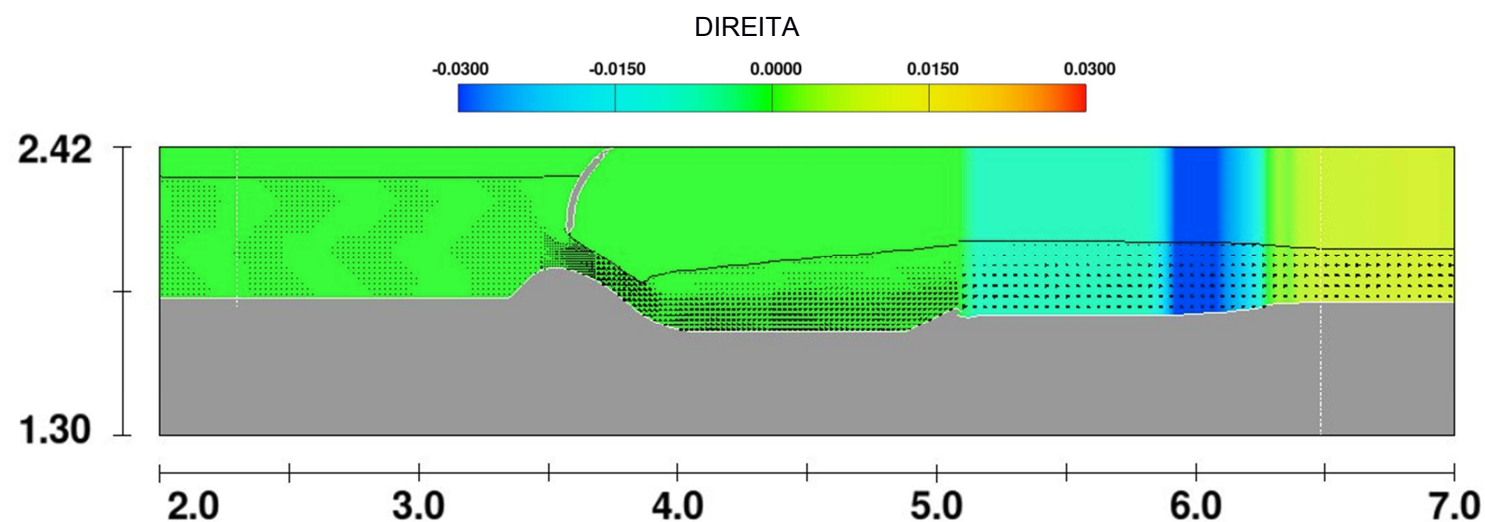


FIGURA 108 – SIMULAÇÃO 11 – ANALISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM - CORTE JUNTO A LATERAL

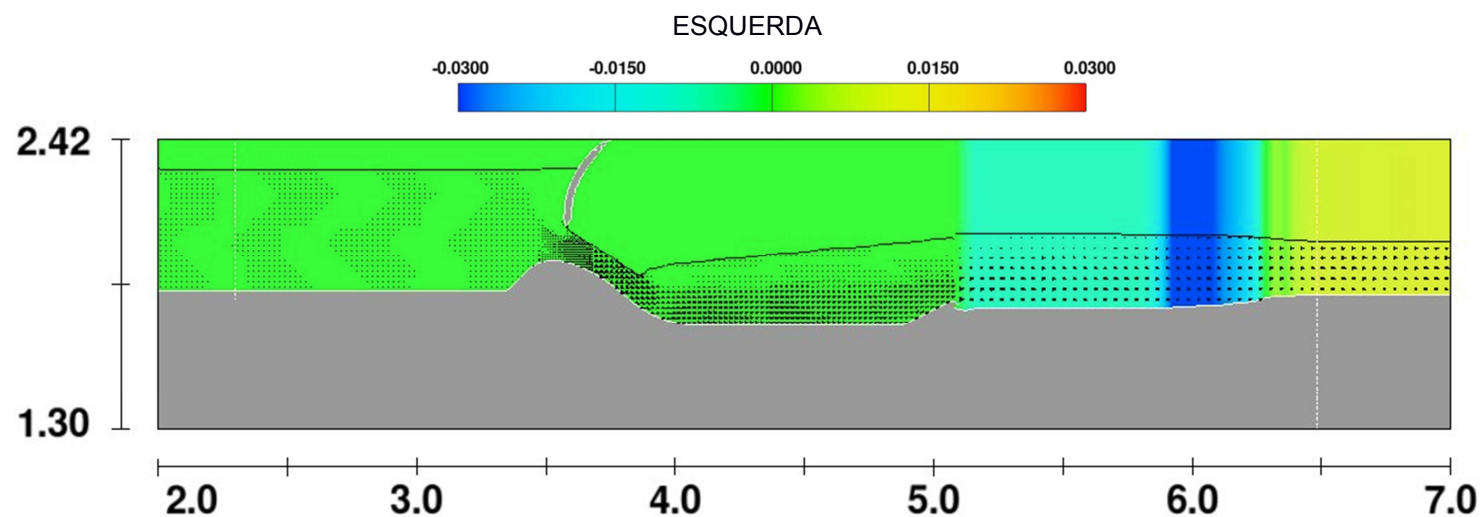


FIGURA 109 – SIMULAÇÃO 12 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - PLANTA

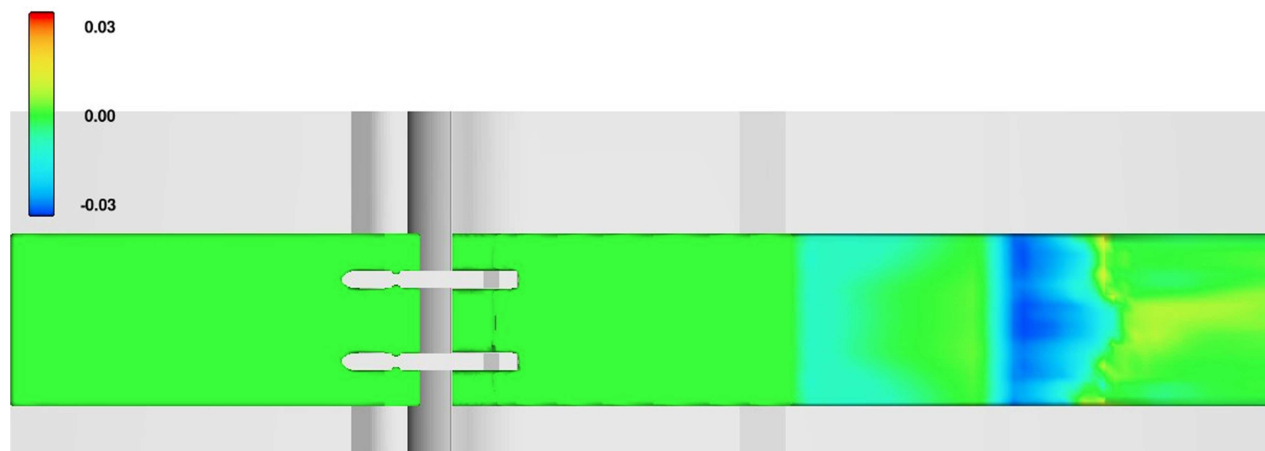


FIGURA 110 – SIMULAÇÃO 12 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE NO CENTRO DO VÃO

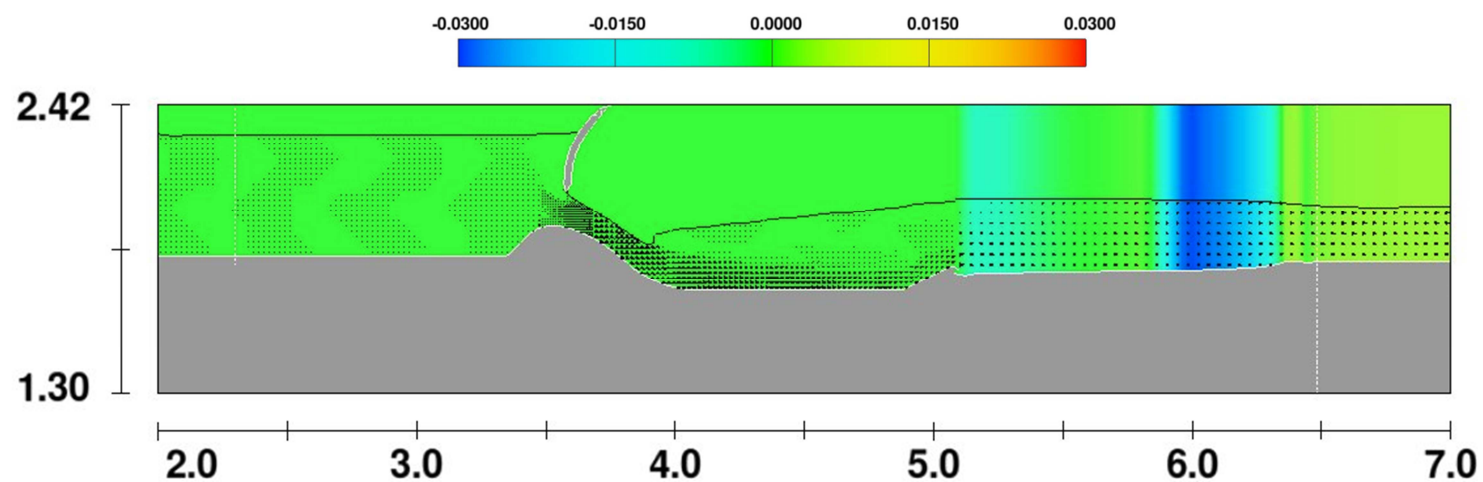


FIGURA 111 – SIMULAÇÃO 12 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL DIREITA

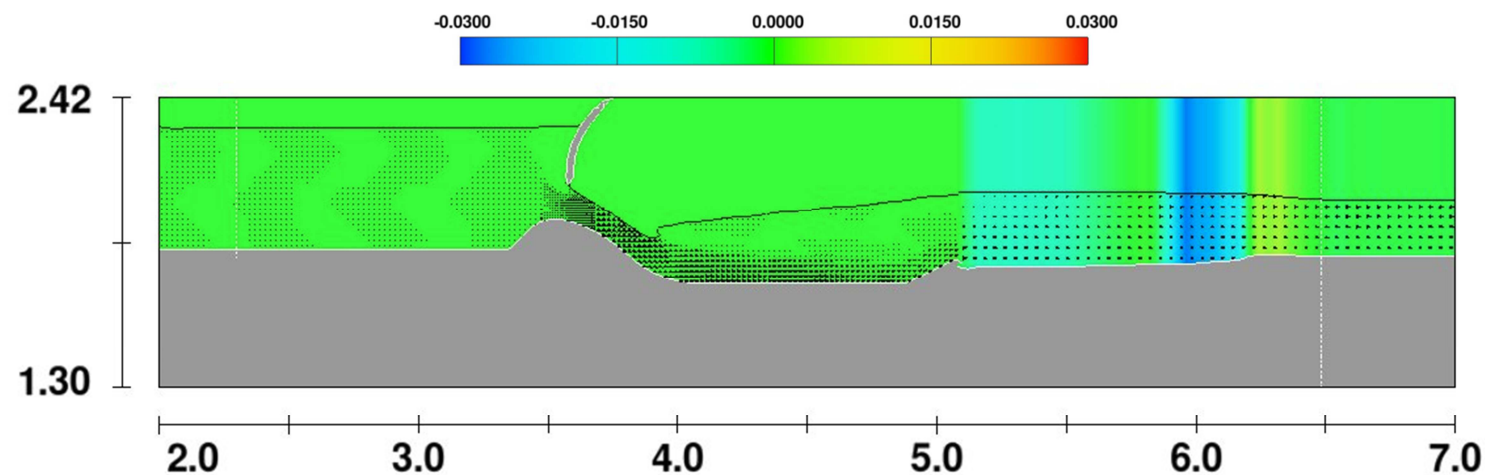
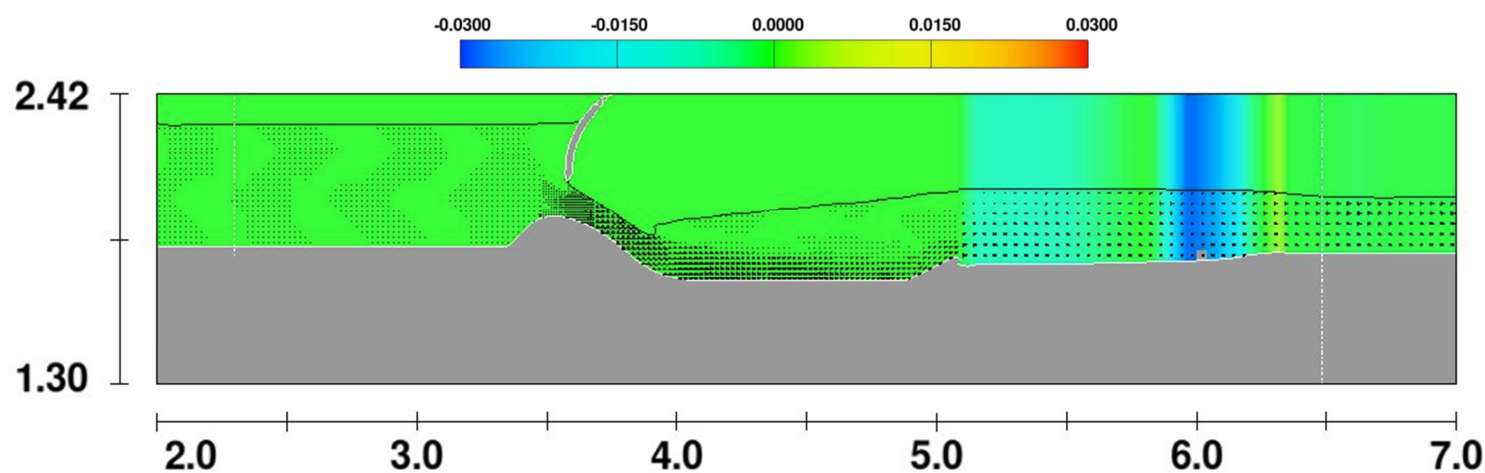


FIGURA 112 – SIMULAÇÃO 12 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – DIÂMETRO MÉDIO DO MATERIAL GRANULAR DE 8 MM E CONDIÇÕES DE CONTORNO NAS LATERAIS - CORTE JUNTO A LATERAL ESQUERDA



APÊNDICE 4 – VELOCIDADES OBTIDAS NAS SIMULAÇÕES EM MODELO NUMÉRICO

FIGURA 113 – SIMULAÇÃO 1 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE

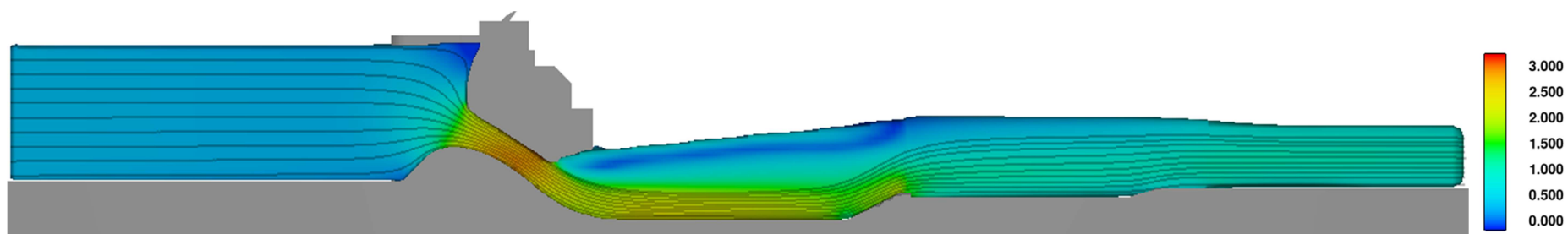


FIGURA 114 – SIMULAÇÃO 2 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE

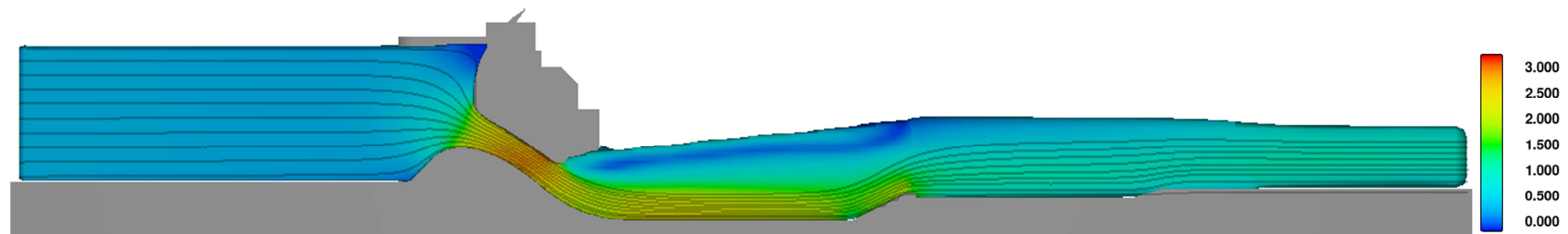


FIGURA 115 – SIMULAÇÃO 3 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE

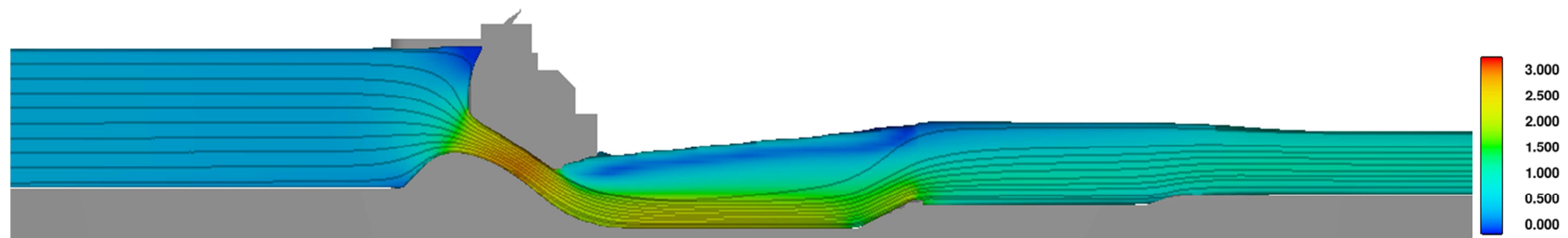


FIGURA 116 – SIMULAÇÃO 4 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE

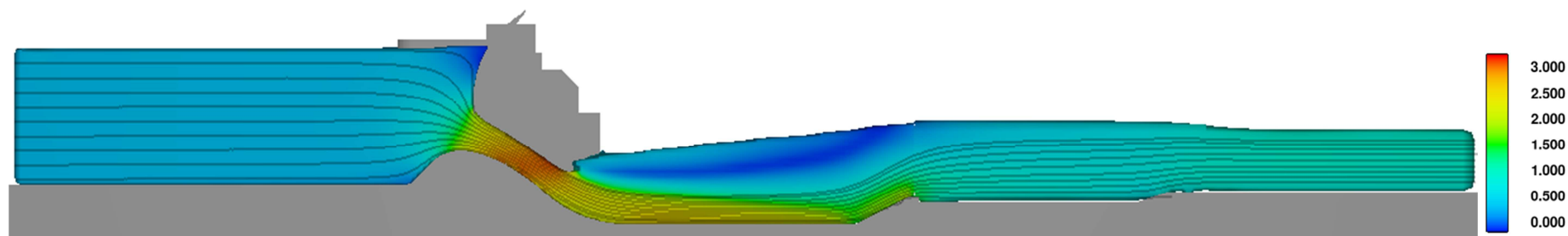


FIGURA 117 – SIMULAÇÃO 5 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE

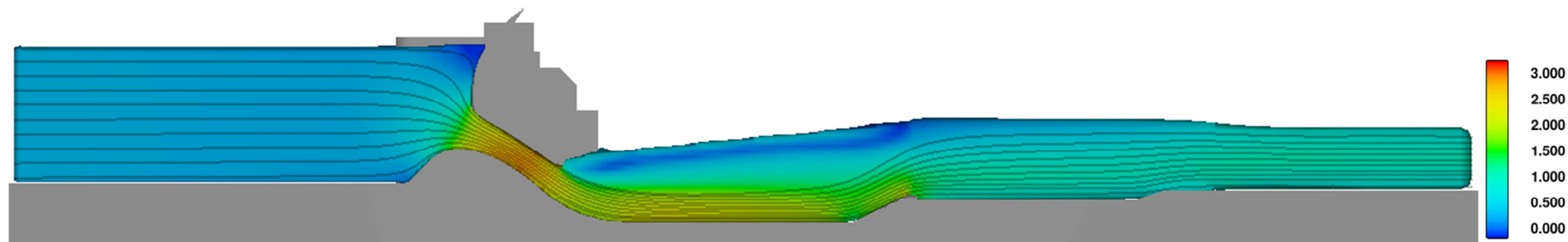


FIGURA 118 – SIMULAÇÃO 6 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE

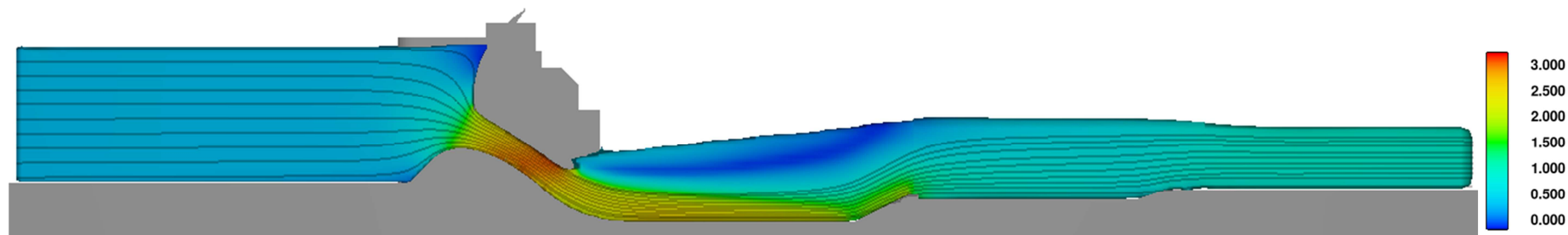


FIGURA 119 – SIMULAÇÃO 7 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE

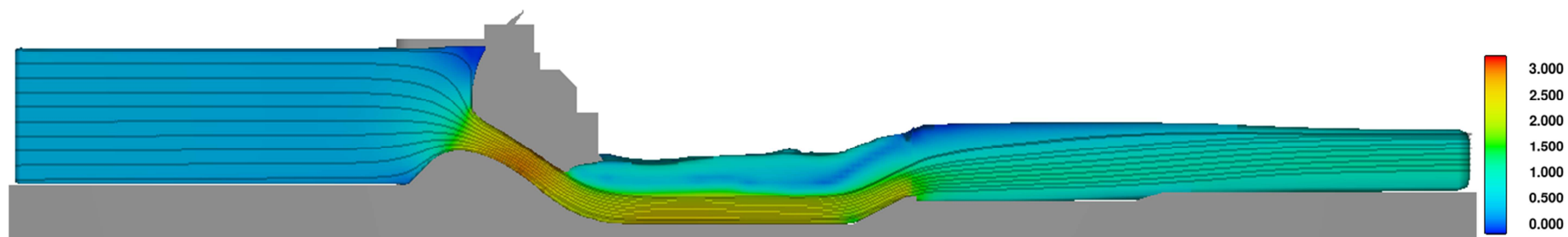


FIGURA 120 – SIMULAÇÃO 8 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE

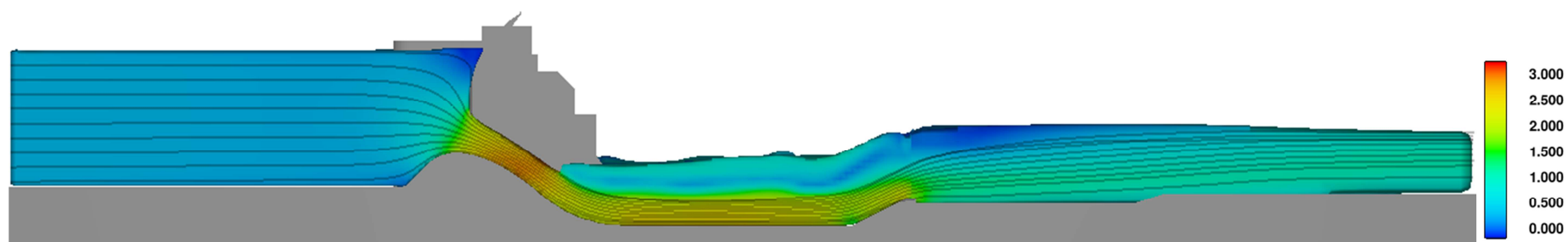


FIGURA 121 – SIMULAÇÃO 9 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE

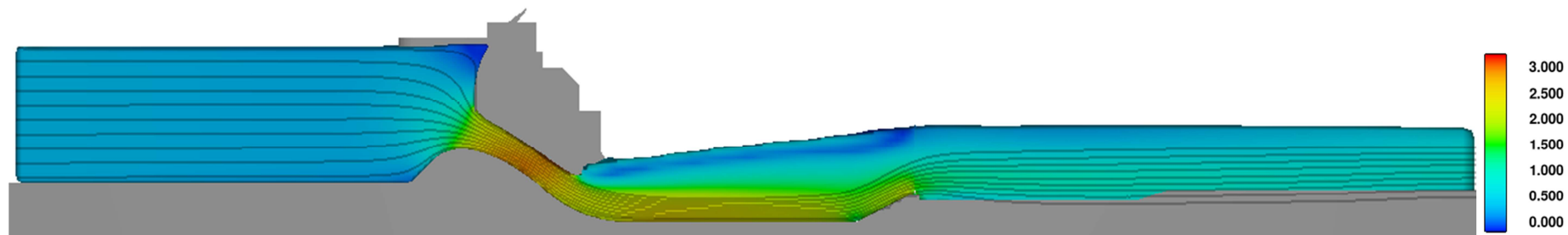


FIGURA 122 – SIMULAÇÃO 10 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE

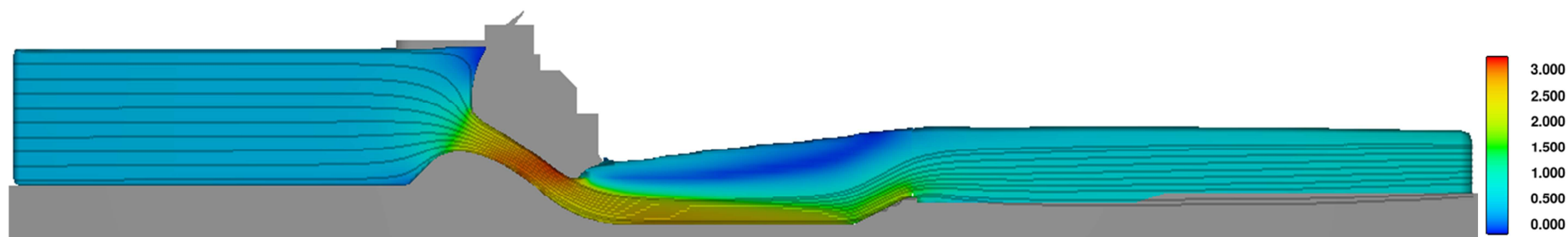


FIGURA 123 – SIMULAÇÃO 11 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE

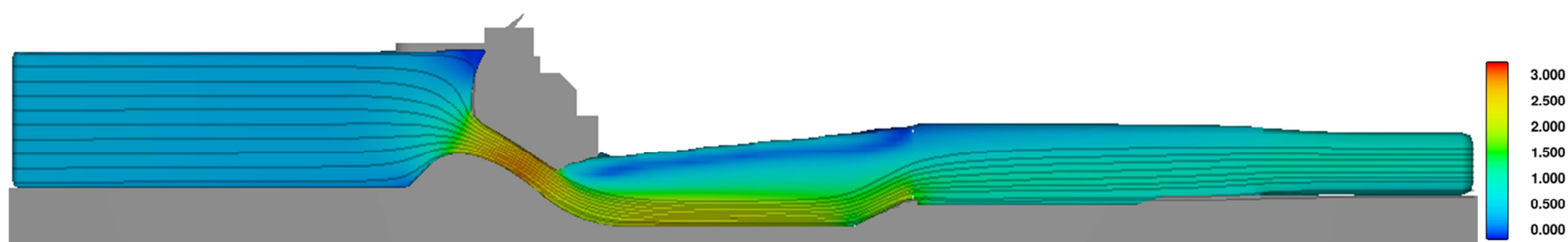


FIGURA 124 – SIMULAÇÃO 12 – VELOCIDADES E LINHAS DE CORRENTE

